INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

BIOFÍSICA
La belleza de las flores de hielo

HISTORIA
El caso contra Copérnico

QUÍMICA
Nanomateriales a la carta

El poder de la mecánica celular

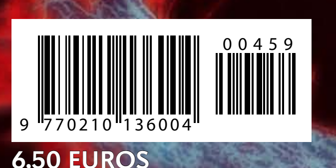
Las fuerzas que modifican la forma de las células pueden causar un impacto tan profundo como los genes

INFORME ESPECIAL
Estado de la ciencia global 2014
CLAVES PARA POTENCIAR LA DIVERSIDAD SOCIAL

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL PODER DE LA MECÁNICA CELULAR | NANOMATERIALES A LA CARTA | EL CASO CONTRA COPÉRNICO

DICIEMBRE 2014 N.° 459



6,50 EUROS



CORTESÍA DE JAMES R. CARTER


7


48


88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Los procesos de la célula no solo están controlados por los genes. La activación de estos depende también de las fuerzas mecánicas generadas por los fluidos fisiológicos y las células vecinas. Estas fuerzas deforman el citoesqueleto, el entramado de proteínas que provee soporte interno a la célula, un hecho que, en última instancia, determina la proliferación o la muerte celular. En la imagen se observa el citoesqueleto (*rojo y azul*) de células Hela. [Institutos Nacionales de Salud de EE.UU.]



Junio y octubre 2014

MATEMÁTICA Y RELIGIÓN

En «La secreta historia espiritual del cálculo» [por Amir Alexander; Investigación y Ciencia, junio de 2014], el autor explica que los matemáticos jesuitas no aceptaron el «método de los indivisibles» propuesto en el siglo XVII por Bonaventura Cavalieri, según el cual un plano se compondría de un número infinito de líneas, y un sólido, de un número infinito de planos.

Sin embargo, hacia 1620 (antes que Cavalieri), el matemático jesuita de origen flamenco Gregorio de San Vicente desarrolló un método que, en esencia, era idéntico al cálculo de indivisibles.

Gregorio de San Vicente albergaba la esperanza de que su *ductus plani in planum*, un método para calcular volúmenes a partir de la suma de planos infinitamente delgados, le permitiese resolver el problema de la cuadratura del círculo. No obstante, sus superiores en Roma argumentaron que la técnica carecía de una base lógica sólida y nunca autorizaron su publicación.

Ad Meskens
Colegio Universitario Artesis Plantijn
Amberes

Responde Alexander: *A la censura que sufrió el método* ductus *propuesto por Gregorio de San Vicente, me gustaría añadir el caso de otro matemático flamenco, el jesuita Andrea Tacquet, quien tres décadas más tarde se interesaría por el método de los indivisibles.*

Tacquet se esforzó en enfatizar que los indivisibles eran un mero artificio heurístico y los acusó de «destruir» la geometría. Esta actitud, sin embargo, no aplacó a las autoridades jesuitas. El prepósito general de la Compañía de Jesús, Goswin Nickel, le ordenó desistir de cualquier investigación matemática original. Tacquet pasó el resto de su vida escribiendo libros de texto para las escuelas jesuitas.

HERENCIA TÓXICA

En «Un nuevo tipo de herencia» [por Michael K. Skinner; Investigación y Ciencia, octubre de 2014] se mencionan las elevadas concentraciones de dioxina a las que, como consecuencia de un accidente en una planta química en 1976, quedó expuesta la población de Seveso, en Italia. A propósito de una investigación sobre las consecuencias de dicho accidente en las mujeres de Seveso, el autor escribe: «[Los investigadores] descubrieron que muchas nietas de las mujeres expuestas daban resultados anómalos en las pruebas de la función tiroidea».

La misma afirmación puede leerse en un artículo previo firmado por Skinner y otros investigadores: «Dioxin (TCDD) induces epigenetic transgenerational inheritance of adult onset disease and sperm epimutations» (*PLoS ONE* 7(9): e46249, 26 de septiembre de 2012). En él, los autores escriben: «Un estudio de la población de Seveso, en Italia, documentó efectos sobre la salud de los nietos (generación F2) de mujeres que habían concebido hasta 25 años después de la exposición a la dioxina [13].»

La referencia [13] corresponde al artículo de Andrea Baccarelli y otros colaboradores «Neonatal thyroid function in Seveso 25 years after maternal exposure to dioxin» (*PLoS Medicine* 5(7): e161, 29 de julio de 2008). Sin embargo, este trabajo no parece evaluar los efectos en los nietos de las mujeres expuestas. En su lugar, analiza los niveles de hormona tiroidea en los recién nacidos (es decir, en los hijos) de dichas mujeres: «Hemos evaluado si la exposición materna a la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-*p*-dioxina (TCDD), un contaminante ambiental tóxico, muy extendido y persistente, está asociada a modificaciones en la función tiroidea neonatal en una gran población expuesta de Seveso, Italia.»

Esta misma objeción apareció en la página web de *Scientific American* a raíz de un artículo publicado en 2012 por Brett Israel sobre los efectos transgeneracionales de la dioxina (www.scientificamerican.com/article/rats-harmed-by-great-grandmothers-exposure-to-dioxin), el cual enlazaba al mismo artículo de Baccarelli.

Creo que este punto merecería una aclaración debido a sus importantes implicaciones.

Josep Roca
Hospital Hermanos Trias Pujol
Universidad Autónoma de Barcelona

Responde Skinner: *Los estudios previos han documentado con claridad los efectos de la dioxina en los hijos de poblaciones expuestas, como la de Seveso, y también en otros casos de exposiciones industriales, como el accidente de Taiwán. Más recientemente, sin embargo, también se han observado y publicado los efectos sobre los nietos. Uno de dichos efectos consiste en alteraciones de la función tiroidea.*

La dificultad de estudiar los efectos de la dioxina reside en que esta puede permanecer en el cuerpo durante décadas y pasar, por medio de la lactancia, a la siguiente generación, que a su vez también la retendrá durante décadas. Esto hace que sus efectos generacionales sean difíciles de interpretar, debido a la bioacumulación y a la prolongada semivida en los individuos. La mayoría de los compuestos no presentan estos efectos de bioacumulación.

Los estudios futuros sobre poblaciones expuestas, como la de Seveso, resultarán esenciales para determinar los efectos generacionales y el papel de la epigenética.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

EXPLORACIÓN ESPACIAL

Un vuelo de prueba crítico para la NASA

Aunque la NASA retiró la lanzadera espacial en 2011, su sustituto se venía fraguando desde mucho antes. La cápsula *Orión*, concebida en 2005, tiene previsto efectuar este mes su primer vuelo de prueba.

De forma cónica y diseñada para llevar astronautas más lejos de lo que jamás se haya hecho, *Orión* recuerda a las cápsulas *Apolo* que en su día llevaron al ser humano a la Luna, si bien es un tercio más grande que estas. Tales dimensiones le permitirán albergar a entre dos y seis tripulantes durante 21 días, más tiempo que ningún otro vehículo, con excepción de las estaciones espaciales.

El vuelo programado para este mes tendrá una duración de cuatro horas, se lanzará desde Cabo Cañaveral y llevará la nave a una órbita terrestre baja, aunque sin astronautas a bordo. Este primer ensayo servirá para comprobar si las cubiertas del cohete se desprenden como deben, si los paracaídas se abren y si el escudo térmico resiste los 2000 grados Celsius de la reentrada en la atmósfera. El vuelo debería allanar el camino para que, en 2021, una misión tripulada visite un asteroide cercano. El objetivo final consiste en llegar a Marte, un viaje que *Orión* efectuará amarrada a un módulo habitable adicional.

Llegado el momento, la nave volará a bordo del Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS), un cohete aún en fase de desarrollo que superará en potencia a todos sus predecesores. Para el ensayo de este mes, la NASA empleará un Delta IV Heavy, fabricado por United Launch Alliance. Su empuje asciende a unos 9 millones de newtons, mucho menos que los cerca de 40 millones de newtons que se esperan del SLS (un 10 por ciento más que el cohete Saturno V que lanzó las cápsulas *Apolo*). La NASA calcula que desarrollar las primeras versiones de *Orión* y el SLS costará unos 22.000 millones de dólares.

Pero es mucho más que dinero lo que está en juego en este primer viaje. Desde que la NASA pusiera fin a la lanzadera espacial, el futuro de los vuelos espaciales estadounidenses se ha visto con escepticismo. Esta misión de prueba podría proporcionar a la agencia un impulso que llevaba tiempo esperando.

—Clara Moskowitz



ENSAMBLAJE de la cápsula *Orión* en el Centro Espacial Kennedy.

Los paneles solares no se activarán durante el primer vuelo de *Orión*; su corta duración hará que no sea necesario que la nave genere su propia energía

Tanques de almacenamiento

Escudo térmico para la reentrada

Adaptador para la conexión con otra nave espacial

Toberas del motor de aborto

MÓDULO DE SERVICIO
Aporta energía y propulsa la nave espacial

MÓDULO PARA LA TRIPULACIÓN
Permite alojar a entre dos y seis astronautas

SISTEMA DE ABORTO DEL LANZAMIENTO
Evacua a la tripulación en caso de emergencia

CORTESÍA DE BEN SMEGELSKY, NASA (*Centro Espacial Kennedy*); CORTESÍA DE LA NASA (*componentes de Orión*)

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Lamentos comunes

Un grito penetrante hiende el aire. Rauda, la madre ciervo corre hacia el lugar donde se origina el sonido para reencontrarse con su cría. Pero en realidad el lamento procede de una red de altavoces, y el reclamo no es de un tierno cervatillo, sino de una cría de oso marino.

Los ciervos y las focas no comparten en absoluto el mismo hábitat, por lo que la madre ciervo no pudo reconocer los gritos de la cría de foca, pensaron los biólogos Susan Lingle, de la Universidad de Winnipeg, y Tobias Riede, de la Universidad del Medio Oeste, autores del experimento acústico. Pero, entonces, ¿por qué la madre ciervo reaccionó con tanta inquietud?

A lo largo de dos veranos, los autores han hecho escuchar a rebaños de ciervos mulo y ciervos de Virginia de una granja canadiense grabaciones modificadas de los reclamos de una variada gama de crías de mamífero: antílopes eland, marmotas, murciélagos, osos y leones marinos, gatos domésticos, perros y seres humanos. Por medio de la observación de las madres ciervo, Lingle y Riede descubrieron que siempre se acercaban a los altavoces si la frecuencia fundamental de los reclamos se asemejaba a la de sus crías. Tal reacción sugiere la presencia de puntos en común entre las vocalizaciones de los mamíferos más jóvenes. (Las madres ciervo no reaccionaron así ante ruido blanco, reclamos de pájaros y aullidos de coyote). Las conclusiones del estudio aparecieron el pasado octubre en *American Naturalist*.

La madre ciervo no debería reconocer las llamadas de la cría de foca

Ya se había propuesto antes que los sonidos emitidos por animales distintos en el curso de experiencias similares (a causa del dolor, por ejemplo) compartían rasgos acústicos. «Los lamentos de las crías de animales nos conmueven a menudo», explica Lingle. Esa empatía podría tener su origen en la similar expresión vocal de las emociones en los mamíferos.

A David Reby, psicólogo de la Universidad de Sussex y estudioso de la evolución de la comunicación, no le sorprenden los resultados. Desde la perspectiva de la joven cría, atraer la atención de cualquier posible cuidador resulta positivo porque mejora sus posibilidades de supervivencia. Y para los progenitores seguramente es mejor responder a cualquier llamada que recuerde vagamente el grito de angustia de su bebé, porque si el detonante es un depredador no hay tiempo que perder en decidir si la cría en peligro es suya o no. El coste por ignorar la llamada es demasiado alto.

Tales resultados podrían dar respuesta al fenómeno de adopción de huérfanos o extraviados por madres de otra especie en condiciones naturales. Si la hembra ha perdido a su pequeño hace poco y sus hormonas todavía favorecen su instinto maternal, afirma Lingle, se verá impulsada a cuidar del retoño si oye su reclamo, sea cual sea su aspecto.

—Jason G. Goldman

CIENCIA DE MATERIALES

Doblado a propósito

A algunos usuarios del iPhone 6 se les ha caído este otoño el alma a los pies al ver que su nuevo artilugio se doblaba, por poco que fuese. Apple respondió afirmando que era un problema rarísimo y que el aguante de sus productos satisface criterios muy severos. Y sin embargo, algunos fabricantes tecnológicos sí quieren que sus dispositivos electrónicos se doblen, aunque a propósito.

Los científicos de materiales llevan años trabajando en componentes que se curven y ondulen. Unos investigadores de la Universidad Nacional de Seúl publicaron en septiembre un artículo en la revista *APL Materials* donde describen un éxito reciente: ledes flexibles que podrían servir para sustituir a las pantallas propensas a romperse. Primero crearon alfombras de hilos microscópicos de nitruro de galio, material cristalino que emite luz, sobre una malla de grafeno ultradelgada (una capa de átomos de carbono flexible, conductora y tenaz). Desprendieron entonces las hojas de grafeno y ledes de su base de cobre y las colocaron sobre un polímero que se podía doblar. Se daban así los primeros pasos hacia una pantalla flexible.

Los ledes azules que llevan casi todas las pantallas de cristal líquido actuales —a sus inventores se les ha concedido este año el premio Nobel de física— son de nitruro de galio, por su eficiencia energética y su brillo. Pero no ha resultado fácil que este material se forme sobre una superficie flexible. Parece que los nuevos ledes del equipo coreano, que brillan sin interrupción durante más de mil ciclos de doblado, logran un equilibrado compromiso entre calidad y flexibilidad. Si se consiguiese integrar las hojas sueltas en una pantalla completa, esos ledes podrían aparecer en futuros teléfonos que se doblen... a propósito.

—Katherine Bourzac



THOMAS FUCHS







LA MARCHA del Pueblo por el Clima congregó a miles de personas en Nueva York.

CAMBIO CLIMÁTICO

Ciudades contra el cambio climático

En la ciudad que nunca duerme, las luces permanecen encendidas toda la noche. Para satisfacer su demanda de alumbrado, calefacción, aire acondicionado y otros servicios, Nueva York emitió en 2005 casi 60 millones de toneladas de gases de efecto invernadero.

Ocho años después, a pesar de que la población ha aumentado y se ha seguido construyendo, las emisiones de la Gran Manzana han disminuido en más de 11 millones de toneladas. ¿Cómo? Prohibiendo la variedad más sucia de petróleo para calefacción y empleando gas natural para generar electricidad.

Nueva York no es la única urbe que se ha tomado en serio el cambio climático. Varias ciudades de todo el mundo están llenando el vacío de liderazgo dejado por los Estados, que llevan más de dos décadas sin emprender medidas de consideración contra el calentamiento global. A la cabeza se han puesto las ciudades costeras, particularmente vulnerables a la subida del nivel del mar y a otros efectos perjudiciales del aumento de las temperaturas.

Copenhague y Melbourne, entre otras, han propuesto medidas para lograr una contribución neta nula a las emisiones de carbono. Este año, durante la Cumbre sobre el Clima de las Naciones Unidas, el Pacto de los Alcaldes (una agrupación de 228 ciudades de todo el mundo en las que viven un total de 436 millones de personas) se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en 2000 millones de toneladas al año. Incluso las urbes chinas se han sumado a tales iniciativas. En 2013, siete regiones del gigante asiático abrieron mercados de derechos de emisión; entre ellas, Shenzen, que el año pasado redujo sus emisiones de dióxido de carbono en 2,5 millones de toneladas, según informó el teniente de alcalde, Tang Jie.

GETTY IMAGES

Tales avances contrastan con el fracaso de China como nación para reducir su intensidad de carbono (las emisiones ponderadas por la actividad económica), tal y como se había comprometido a hacer en un plan quinquenal que vencerá el año próximo. China, EE.UU. y el resto del mundo han estado arrojando a la atmósfera más de 36.000 millones de toneladas de gases de efecto invernadero al año, una cifra que sigue en aumento.

Ante la falta de avances, no menos de 100.000 personas tomaron el pasado mes de septiembre las calles de Nueva York para exigir una respuesta por parte de los líderes mundiales. Los participantes en la Marcha del Pueblo por el Clima expresaron su esperanza de que el año próximo, cuando los representantes se reúnan en París con motivo de la vigésima primera conferencia internacional sobre el tema, se logre un acuerdo vinculante para reducir las emisiones. Numerosos expertos en política climática creen, sin embargo, que la reunión no dará para tanto. (El pasado mes de noviembre, China y EE.UU. alcanzaron un acuerdo bilateral de reducción de emisiones.)

Vayan como vayan las conversaciones internacionales, un análisis del grupo de ciudades C40 ha concluido que, para 2050, las iniciativas municipales podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en 8000 millones de toneladas. Aunque se trata de una cifra considerable, sus objetivos no van mucho más allá de los que alcanzara en su día el Protocolo de Montreal, firmado en 1987. En este sentido, un acuerdo internacional conseguiría de una sola tacada lo que, de otro modo, requerirá aprobar cientos de leyes locales. Mientras tanto, y a falta de un acuerdo internacional, las ciudades seguirán con las luces encendidas, trabajando para reducir las emisiones.

—David Biello



FÍSICA ATMOSFÉRICA

Pronóstico: nublado

Hace tiempo que las nubes traen de cabeza a los climatólogos. ¿Reflejan la luz solar hacia el espacio y contribuyen así a enfriar el planeta, o absorben y reemiten calor, con el resultado contrario? El efecto neto de las nubes sobre un clima cambiante sigue siendo una incógnita. El pasado mes de septiembre, un grupo de expertos de la NASA viajó al Ártico para obtener más datos al respecto. A bordo de un avión C-130 equipado con radiómetros solares, térmicos y de microondas, los investigadores midieron el flujo de luz solar y calor a través de las nubes; además, escrutaron la banquisa de Alaska a lo largo de una extensión de más de 850.000 kilómetros cuadrados.

Su trabajo complementa el llevado a cabo por otro equipo de la Universidad de Alaska en Fairbanks que, auspiciado también por la NASA, mide el tamaño de los glaciares desde aviones DHC-3 Otter, como el que muestra la imagen. En ambos casos, los aviones obtienen datos más precisos que los satélites. Según William Smith, investigador de la NASA y líder del proyecto, los datos estarán a disposición de la comunidad científica antes de seis meses.

—Amy Nordrum

CORTESÍA DE CHRIS LARSEN, UNIVERSIDAD DE ALASKA FAIRBANKS; CPAN (*telescopios*)

AGENDA

CONFERENCIAS

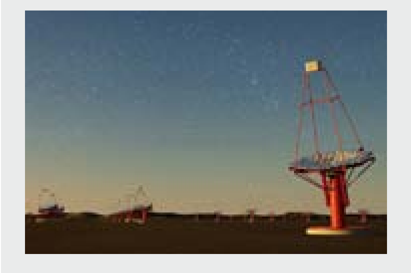
2 de diciembre
Gaia y la odisea galáctica
Investigadores del Grupo Gaia, Universidad de Barcelona
Acto del congreso internacional «La Vía Láctea descubierta por Gaia»
Paraninfo de la Universidad de Barcelona
http://gaia.ub.edu/finalconference

4 de diciembre
La misión Rosetta al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko: Primeros resultados
Pedro Gutiérrez, Instituto de Astrofísica de Andalucía - CSIC
Planetario de Madrid
www.planetmad.es > Actividades

EXPOSICIONES

Hasta el 9 de enero de 2015
Rompiendo barreras. Mujeres y ciencias
Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero
Valencia
www.ihmc.uv-csic.es > Divulgación

Hasta el 11 de enero de 2015
La física en nuestras vidas
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com



Hasta el 12 de enero de 2015
Cristales, un mundo por descubrir
Ámbito Cultural de El Corte Inglés
Málaga
http://cristales2014.org

Cristales a la luz de los rayos X. Cristales, difracción, estructura
Biblioteca de Física y Química
Universidad de Barcelona
http://crai.ub.edu/es/node/1868

OTROS

11 de diciembre – Jornada de Santa Lucía para periodistas
Alimentos para la ciudad
Instituto de Estudios Catalanes
www.cienciaensocietat.org

EPIDEMIOLOGÍA

Exposición prenatal a contaminantes y salud infantil

La importancia de la vida antes de nacer

MIREIA GASCÓN MERLOS

Los factores genéticos, los ambientales y la interacción entre ellos determinan nuestro desarrollo y, por ende, nuestra salud. El desarrollo del cuerpo humano es especialmente pronunciado durante la gestación, un período en el que el organismo experimenta grandes cambios en pocos meses y en el que, además, debe seguir un programa diario muy estricto. Cualquier desviación con respecto al plan «oficial» puede afectar al correcto desarrollo del bebé y provocar efectos adversos. Aunque algunos de ellos no pueden observarse a nivel individual, en ocasiones sí resulta posible detectarlos a nivel poblacional.

A través del cordón umbilical, el feto recibe nutrientes y oxígeno procedentes de la sangre de la madre, pero también sustancias potencialmente tóxicas. La capacidad del feto para eliminarlas resulta menor que en los adultos. Por ello, la mayoría de los estudios que evalúan los efectos de los factores ambientales en la salud infantil se han centrado en esta etapa vital del desarrollo humano.

En los últimos 30 o 40 años, la prevalencia del asma y la alergia infantil ha crecido de forma muy acusada, llegando a superar el 20 por ciento en algunos países, sobre todo los industrializados. En este período también han aumentado los casos de obesidad infantil y, en menor medida, los de déficit de atención e hiperactividad. Aunque no existe un consenso científico sobre las causas que han provocado este rápido incremento, sí se acepta que, debido al poco tiempo transcurrido, tales aumentos no obedecen a factores genéticos, sino ambientales.

El proyecto Infancia y Medioambiente (INMA), en el que participan varios centros de investigación españoles, es un estudio de cohortes de nacimiento que, desde hace varios años, intenta analizar los efectos de varios factores ambientales en la salud infantil. Entre 1997 y 2008, más de 3000 mujeres embarazas procedentes de diferentes zonas de España fueron reclutadas para el estudio. Tras el parto, la salud de los niños ha sido evaluada a distintas edades mediante tests de neurodesarrollo y cuestionarios de salud. Gracias a las muestras de sangre y orina maternas obtenidas durante el embarazo, se ha podido cuantificar la exposición prenatal a ciertos contaminantes y estudiar su posible relación con la salud de los pequeños.

Dado que resulta imposible enumerar y analizar todas las sustancias contaminantes en un artículo, hemos elegido cuatro exposiciones para las que se dispone de más información, así como dos que actualmente se encuentran en el punto de mira de los epidemiólogos ambientales. El resto se han resumido en la tabla adjunta.

Tabaco

Las madres que fuman o que permanecen expuestas de forma pasiva al humo del tabaco durante el embarazo presentan más probabilidades de dar a luz bebés de bajo peso. Se ha calculado que estos niños necesitan una media de seis años para alcanzar la misma altura que aquellos cuya madre no sufrió exposición al tabaco durante la gestación. También se ha observado que muestran una mayor probabilidad de padecer problemas respiratorios, como síntomas asociados al asma.

Contaminación atmosférica

Los científicos convienen en que la contaminación urbana del aire perjudica la salud respiratoria de los niños con asma. Además, diversos estudios han hallado que los niños que viven cerca de calles con alta densidad de tráfico tienen más probabilidades de presentar síntomas respiratorios (hasta un 40 por ciento más que quienes viven lejos de estas vías).

En particular, se ha demostrado que los niños que habitan en las inmediaciones de una autopista sufren un mayor riesgo de crecer con vías respiratorias de menor tamaño, así como de padecer asma. Tales efectos parecen más acusados si la exposición tiene lugar durante el embarazo.

Metilmercurio

Los efectos del metilmercurio en el neurodesarrollo infantil se conocen desde hace tiempo. Entre 1932 y 1938, la petroquímica Chisso vertió toneladas de mercurio en la bahía de Minamata, en Japón. En esos años, numerosas madres que habían ingerido pescado altamente contaminado y que no presentaron signos de intoxicación por metilmercurio dieron a luz a niños con problemas neurológicos, entre otros trastornos.

Las fuentes principales de metilmercurio (hasta un 90 por ciento) las hallamos en el pescado y el marisco, alimentos muy consumidos en España. En 2011, en un estudio con casi 1900 participantes, los investigadores del proyecto INMA comprobaron que aquellas madres que consumían más cantidad de ciertos pescados (depredadores de gran tamaño, como pez espada, tiburón, atún rojo grande y lucio) presentaban niveles más elevados de mercurio total en sangre. Además, un 64 por ciento de ellas superaba el valor máximo recomendado por la Agencia de Protección Ambiental estadounidense (6,4 microgramos de mercurio total por litro de sangre).

En 2009, un estudio del mismo proyecto ya había obtenido resultados similares, por lo que en 2010 el Ministerio de Sanidad recomendó que las mujeres embarazadas y los niños menores de 3 años evitasen consumir tales pescados. Eso no implica que deba renunciarse a otras especies, ya que el pescado contiene aminoácidos esenciales, ácidos grasos y vitaminas que sí resultan beneficiosos para el correcto desarrollo del feto.

Compuestos orgánicos persistentes

Por compuestos orgánicos persistentes (POP, por sus siglas en inglés) se conoce una variedad de sustancias que, usadas en la industria y en la agricultura, se degradan con dificultad, por lo que permanecen

en el entorno y en los tejidos animales durante largo tiempo.

En los años setenta comenzó a observarse el efecto de los POP como alteradores del sistema endocrino, lo que condujo a su prohibición en la mayoría de los países desarrollados, incluida España. Aun así, algunos de estos compuestos, como el diclorodifeniltricloroetano (DDT), se siguen usando para el control del mosquito de la malaria en África y Asia. Los efectos nocivos de los POP quedaron patentes en dos accidentes ocurridos en 1968 y 1979 en Japón y Taiwán, respectivamente, en los que miles de personas quedaron expuestas a dosis elevadas de policlorobifenilos (PCB) y dioxinas a través de aceite de cocina contaminado. Como consecuencia, numerosas gestantes dieron a luz a niños con problemas respiratorios, inmunitarios y neurológicos, entre otros.

En el caso de exposiciones menores, como las que podríamos encontrar hoy en día, las consecuencias resultan más sutiles. Con todo, a nivel poblacional se ha observado que pueden producirse pequeños efectos en el neurodesarrollo infantil. Varios trabajos, entre los que se incluye otro estudio del proyecto INMA, han constatado que los niños expuestos a POP durante el embarazo presentan un riesgo mayor de sufrir a lo largo de su vida infecciones respiratorias y síntomas relacionados con el asma. Otros estudios han observado que estos compuestos podrían también reducir la respuesta infantil a ciertas vacunas, un fenómeno que, aunque no llegue a suponer un riesgo para la salud pública, sí estaría indicando un debilitamiento del sistema inmunitario.

Bisfenol A y ftalatos

El bisfenol A (BPA) y los ftalatos, también alteradores del sistema endocrino, se usan

PERSISTENCIA

Persistentes
Resisten a la degradación a través de procesos químicos, biológicos o fotolíticos. Persisten en el medio durante años y se acumulan en los tejidos animales y humanos.

Ejemplos: organoclorados, PBDE, PFC.



No persistentes
Se degradan con facilidad y se eliminan de los tejidos en horas, días o semanas. En consecuencia, resulta más difícil definir la exposición real a largo plazo de un individuo (se requieren varias mediciones a lo largo del tiempo).

Ejemplos: plaguicidas no persistentes*, BPA, parabenos, ftalatos, humo de tabaco, contaminantes urbanos del aire**, DBP.



VÍAS DE EXPOSICIÓN

Ingestión
Es una de las vías más importantes. La exposición principal suele producirse a través de la dieta, si bien en el caso de niños pequeños puede también ocurrir cuando se llevan las manos a la boca.

Ejemplos: BPA, ftalatos, PAH, organoclorados, PBDE, plaguicidas no persistentes*, parabenos, PFC, DBP.



Inhalación
Afecta sobre todo a las sustancias tóxicas derivadas del tráfico viario y las presentes en el humo del tabaco.

Ejemplos: BPA, ftalatos, humo del tabaco, PBDE, plaguicidas no persistentes*, contaminantes urbanos del aire**, DBP.



Contacto con la piel
Atañe principalmente a las sustancias presentes en los productos de higiene personal y cosméticos.

Ejemplos: ftalatos, parabenos, PFC, DBP.



EFECTOS EN LA SALUD INFANTIL

Crecimiento intrauterino menor
Algunos de los problemas derivados de un menor crecimiento intrauterino pueden perdurar hasta la adultez. Un menor peso al nacer se ha asociado a problemas cardiovasculares en la vida adulta.

Ejemplos: humo del tabaco, contaminantes urbanos del aire (*indicios sólidos*). Organoclorados, BPA, ftalatos y metales pesados (*indicios leves*).



Obesidad
Desde 1980, los casos de obesidad han aumentado en más del doble en todo el mundo. En 2010, alrededor de 40 millones de niños menores de cinco años padecían sobrepeso.

Ejemplos: organoclorados, BPA y ftalatos (*indicios leves*).



Alteraciones del neurodesarrollo
El sistema nervioso es uno de los más sensibles a la exposición a agentes tóxicos durante el embarazo.

Ejemplos: plomo y mercurio (*indicios sólidos*). Organoclorados, PBDE, algunos plaguicidas no persistentes* (*indicios leves*).

Alteraciones inmunitarias
Se cree que el rápido aumento de la prevalencia que en los últimos años han experimentado enfermedades como el asma y otras relacionadas con el sistema inmunitario guarda una relación con los factores ambientales.

Ejemplos: humo de tabaco, contaminantes urbanos del aire (*indicios sólidos*). Organoclorados, BPA, ftalatos y metales pesados (*indicios leves*).



PBDE: polibromodifenil éteres; PFC: compuestos perfluorados; BPA: bisfenol A; DBP: productos derivados de la desinfección del agua; PAH: hidrocarburos aromáticos policíclicos (*siglas en inglés*).

* Neonicotinoides, carbamatos, organofosforados, piretroides, entre otros.

** Gases como el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO), los PAH, el ozono (O_3) y los óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, así como partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10}.

ILUSTRACIONES DE THINKSTOCK

desde hace décadas en la fabricación de plásticos y latas. Algunos ftalatos se emplean también en la elaboración de perfumes y productos cosméticos.

Estos compuestos han llamado recientemente la atención por su posible relación con el incremento de la obesidad en la población general e infantil. También se cree que podrían explicar parte del aumento de la prevalencia global de asma. Aun así, hacen falta más estudios que confirmen los resultados obtenidos hasta ahora, tanto con modelos animales como con niños. Por precaución, Francia ya ha prohibido el uso de BPA en recipientes para alimentos.

Plaguicidas no persistentes

Este grupo incluye, entre otros, los organofosfatos, piretroides, carbamatos y neocotinoides. Se usan para el control de plagas en agricultura, ganadería, jardinería o en edificios, así como para eliminar piojos en niños.

Aunque en muchos casos no existe suficiente información sobre sus efectos sobre la salud infantil, numerosos de estos productos han sido diseñados para actuar sobre el sistema nervioso de los insectos, por lo que existe el riesgo de que también influyan en el neurodesarrollo humano. Algunos estudios han observado una reducción de las capacidades cognitivas en niños que habían sufrido una mayor exposición prenatal al clorpirifós, un organofosforado. Se cree que algunos de estos compuestos podrían afectar también al sistema inmunitario.

Retos epidemiológicos

Si bien hasta ahora ha sido posible demostrar con claridad los efectos de ciertos contaminantes sobre la salud infantil, en otros casos la información disponible es aún limitada. La obtención de resultados epidemiológicos también puede verse dificultada por otros factores. Por ejemplo, algunos estudios han observado que los efectos del metilmercurio y los de los PCB en el neurodesarrollo infantil se amplifican cuando coexisten ambas exposiciones. Otros trabajos han constatado que los efectos perniciosos del tabaco sobre los genes del feto pueden llegar a afectar a los nietos, un mecanismo que se cree que podría ser válido para muchas otras exposiciones.

Así pues, a pesar de toda la información acumulada durante los últimos años, el campo de la epidemiología ambiental tiene aún un largo camino por recorrer para entender el efecto sobre el organismo de las diferentes sustancias, cómo interaccionan entre ellas y hasta dónde llega su impacto.

¿Qué puedo hacer yo?

A menudo, las madres embarazas se sienten impotentes ante la dificultad que supone evitar ciertas exposiciones. Aunque es cierto que en muchos casos resulta complicado eliminarlas por completo, siempre pueden tomarse algunas medidas sencillas: no fumar y no permanecer expuesta al humo del tabaco, evitar las calles con más tráfico, usar la campana de ventilación en la cocina, mantener aireado el interior de la casa, emplear productos de limpieza naturales en lugar de sintéticos, evitar el uso de envoltorios plásticos o latas para la comida, revisar qué compuestos incluyen los productos cosméticos y de higiene personal, renunciar al consumo de ciertos pescados de gran tamaño y preferir alimentos de producción ecológica.

También podemos tomar otras medidas que, aunque no evitarán la exposición a contaminantes, sí mejorarán nuestra salud y la del niño: hacer deporte, llevar una dieta equilibrada, no ingerir alcohol durante el embarazo, consumir al menos cinco piezas de fruta y verdura al día, tomar suficiente agua y descansar.

—Mireia Gascón Merlos
Centro de Investigación en Epidemiología Ambiental
Parque de Investigación Biomédica de Barcelona

PARA SABER MÁS

Prenatal mercury exposure in a multicenter cohort study in Spain. R. Ramon et al. en *Environment International*, vol. 37, págs. 597-604, abril de 2011.
Effects of persistent organic pollutants on the developing respiratory and immune systems: A systematic review. M. Gascon et al. en *Environment International*, vol. 52, págs. 51-65, febrero de 2013.
Proyecto INMA: **www.proyectoinma.org**

COMUNICACIÓN

Ciencia accesible a todo el mundo

Aunque la mayoría de revistas científicas siguen siendo de pago, cada vez hay más artículos de investigación de acceso libre en Internet. El interés de ese movimiento es tanto científico como económico

CHRISTINE BERTHAUD Y AGNÈS MAGRON

¿Conocen a Jack Andraka? Este joven estadounidense de quince años puso a punto una prueba de diagnóstico de cáncer de páncreas sencilla y barata. Tras la muerte de un familiar afectado de dicha enfermedad, el adolescente inventó, él solo, mediante búsquedas en Internet y leyendo estudios médicos de acceso libre, un método revolucionario. El resultado fue sorprendente. Algunos lectores no se extrañarán, cuando todo es gratuito en la Red, de que un internauta haya podido contrastar de forma gratuita la bibliografía científica. Sin embargo, ello ha sido posible después de grandes esfuerzos: es el fruto de un movimiento internacional, el «Acceso abierto», nacido en el seno de una comunidad científica determinada a recuperar la difusión de los resultados que ella misma ha producido.

La edición científica supone un mercado lucrativo, sobre todo en las ciencias naturales (química, medicina, biología y física), evaluado en 17.300 millones de euros en 2011. Publicar representa un gran reto para los investigadores: constituye el medio para dar a conocer su trabajo, ser reconocidos por los colegas, progresar en su carrera y obtener financiación. En general, no perciben derechos de autor por sus publicaciones. También hay investigadores que revisan, en calidad de expertos, los textos que se envían a los

editores. Este proceso de evaluación, conocido como revisión por expertos o por pares (*peer review*), es indisociable de la publicación científica; permite validar los resultados presentados en el texto, en particular desde el punto de vista metodológico. Pero este trabajo de relectura no es retribuido por los editores: ser considerado «experto» constituye de alguna manera una especie de remuneración simbólica. El soporte más utilizado para la difusión es la revista, aunque, en ciencias humanas y sociales, los libros son también importantes.



THINKSTOCK/DREAMERVE

Un mercado controlado

La mayoría de los lectores de publicaciones científicas son investigadores. Sin embargo, son mayormente las bibliotecas universitarias o de centros de investigación (del 68 al 75 por ciento) quienes adquieren las obras y financian la suscripción a las revistas. Los precios son tan prohibitivos (una media de 4450 dólares la suscripción anual a una revista de química o 2322 dólares a una de astronomía), que solo los presupuestos institucionales pueden afrontarlos. Y los precios no dejan de aumentar, sobre todo después de la llegada de la publicación digital.

Durante un tiempo, los editores justificaron esos aumentos por las inversiones que tenían que hacer para adaptarse y digitalizar sus archivos —que, una vez digitalizados, son vendidos de nuevo—. En su mayor parte, tratan con una clientela que no puede elegir: una biblioteca debe ofrecer a sus usuarios las revistas fundamentales de su disciplina. La digitalización ha reforzado esta dimensión: las revistas se ofrecen en lotes que deciden los editores y las bibliotecas tienen que negociar las licencias de acceso para sus usuarios.

¿Quién vende? El mercado de la edición científica está dominado por empresas privadas; algunas de ellas cotizan en bolsa. Cuatro grandes sociedades controlan el mercado: Reed-Elsevier (con una cartera de 2000 títulos de revistas), Springer-Verlag, Blackwell-Riley y Thomson Reuters. Esta situación de monopolio despierta las críticas de la comunidad científica, que ve un desvío, por parte de operadores privados, de fondos públicos que subvencionan la investigación tanto por anticipado (los salarios de los investigadores) como posteriormente (subvenciones a bibliotecas). Además, la presión económica ejercida a las bibliotecas amenaza la difusión de los resultados.

La digitalización ha permitido superar las limitaciones de la distribución en papel. Y la rápida e intensa asimilación de estos nuevos medios de comunicación por algunas comunidades de investigadores ha favorecido la irrupción de aplicaciones que han revolucionado el acceso a la bibliografía científica.

De *ArXiv* al acceso libre

En el campo de la física es necesario compartir rápidamente el resultado de la investigación. Con este objetivo, Paul Ginsparg creó, en 1991, en el Laboratorio de Los Álamos, en la Universidad de California, el primer servidor de archivos abiertos *hep-th* (*High Energy Physics-Theory*), conocido actualmente con el nombre de *ArXiv* (arxiv.org). Este servidor, en el cual los investigadores depositan sus artículos (publicados o no) en forma de ficheros, sirvió de modelo a otros proyectos que respondían a la definición de lo que más tarde se llamó *Open access*, el acceso abierto a las publicaciones científicas.

Ese nuevo concepto se formalizó en 2002 mediante una declaración, la Iniciativa de Budapest de Acceso Abierto (BOAI, por sus siglas en inglés), que definió dos estrategias para poner en acceso libre las publicaciones de los investigadores: la «vía verde», mediante la cual los propios autores ponen sus textos en línea en la Red, y la «vía dorada», o publicación en revistas electrónicas de acceso abierto. Desde 2003, las grandes instituciones de investigación y de enseñanza superior se comprometen a mantener políticas de acceso abierto; con este propósito, estimulan a sus investigadores para que depositen sus publicaciones en servidores de archivos abiertos en las bibliotecas de universidades y otras instituciones. En julio de 2012, la Comisión Europea pidió a los estados miembros que definieran una política titulada «Hacia un mejor acceso a la información científica: Incrementar los beneficios de la inversión pública en investigación».

En Francia, la vía dorada está representada principalmente por el Centro de Edición Electrónica Abierta (CLEO), que está gestionado por Open-edition, un portal de revistas de ciencias humanas y sociales. Para la vía verde, el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS) creó en el año 2000 el Centro para la Comunicación Científica Directa (CCSD), cuya principal misión es la gestión del archivo abierto HAL (Hiper artículos en línea) interconectado con los grandes servidores internacionales como PubMed Central, de los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos, que ofrecen numerosos archivos de ciencias de la vida.

A diferencia de *ArXiv*, que les sirvió de modelo, HAL reúne publicaciones procedentes de todos los campos científicos, depositadas en su mayor parte (más del 60 por ciento) por los propios autores o por profesionales de la documentación. Dicho depósito se realiza respetando los derechos de los diferentes actores de la publicación. Esta plataforma es utilizada en Francia por el conjunto de universidades y centros de investigación. HAL, que forma parte de la puesta en práctica de la política exigida por la Comisión Europea, está subvencionada también por el

EL ACCESO ABIERTO EN ESPAÑA, UN HECHO

En el año 2002 se definió por primera vez el significado de acceso abierto en la Declaración de Budapest:

«Por Acceso Abierto [a la bibliografía científica revisada por pares] nos referimos a la disponibilidad gratuita en Internet, que permite a cualquier usuario leer, descargar, copiar, distribuir, imprimir, buscar o añadir un enlace al texto completo de esos artículos, rastrearlos para su indización, incorporarlos como datos en un *software* o utilizarlos para cualquier otro propósito que sea legal, sin barreras financieras, legales o técnicas, aparte de las que son inseparables del acceso mismo a Internet...».

En ese momento en España ya existía el repositorio TDX de tesis doctorales creado en el año 2001. En 2004, se puso en marcha el primer repositorio institucional de acceso abierto de la Universidad Complutense de Madrid. Pero fue a partir del 2006 cuando empezó a observarse el arranque en la creación de repositorios institucionales de universidades y centros de investigación; en la actualidad son ya 71, lo que significa que la mayoría de estos centros cuenta con uno o más repositorios para dar acceso, difundir y preservar su producción científica, académica y docente. El año 2006 también fue una fecha señalada: se creó el grupo OS-Repositorios, formado por profesionales, sobre todo vinculados a bibliotecas universitarias y servicios de gestión de información, que comparten sus experiencias e inquietudes; sirve de germen de una comunidad que sigue viva y activa (en marzo de 2015 celebrará sus 6.as jornadas). Esta iniciativa también ha impulsado la participación de grupos de trabajo españoles en proyectos internacionales como DRIVER, OpenAire, NECOBELAC, MEDOANET o FOSTER, todos ellos financiados por la Comisión Europea.

Otra institución impulsora y patrocinadora de proyectos e iniciativas que tienen que ver con el acceso abierto a la ciencia ha sido la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT). En colaboración con Rebiun, ha patrocinado la creación del portal Recolecta y de los grupos de trabajo para el establecimiento de directrices para mejorar la calidad de los repositorios, entre otras actividades.

Respecto a las políticas institucionales en favor del acceso abierto, 22 universidades españolas disponen de políticas declaradas y aprobadas por sus órganos de gobierno, de las cuales el 50 por ciento requieren el depósito de las publicaciones y otros materiales en sus respectivos repositorios. También existen políticas de comunidades autónomas como el Principado de Asturias y la Comunidad de Madrid, que han incorporado a sus convocatorias de proyectos la condición de facilitar el acceso abierto a la producción científica derivada de los proyectos financiados por los respectivos Gobiernos autonómicos. Por otro lado, la Ley 14/2011 de 1 de junio de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación fue pionera —no solo en España, sino también en Europa— en introducir en su texto un artículo, el 37, con el título «Difusión en acceso abierto», cuyo punto 2 dice:

«El personal de investigación cuya actividad investigadora esté financiada mayoritariamente con fondos de los Presupuestos Generales del Estado hará pública una versión digital de la versión final de los contenidos que le hayan sido aceptados para publicación en publicaciones de investigación seriadas o periódicas, tan pronto como resulte posible, pero no más tarde de doce meses después de la fecha oficial de publicación».

En resumen, España ha sabido subirse al tren del acceso abierto en un viaje sin retorno. El acceso abierto cada día está más presente, no solo entre la comunidad científico-académica, sino también entre los ciudadanos interesados por la ciencia. La ciencia abierta favorece, además del acceso, la colaboración entre comunidades y la transparencia en la generación de esos resultados, sobre todo si se comparten y hacen visibles y accesibles los datos que subyacen a cualquier investigación.

—Remedios Melero
www.accesoabierto.net
Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, CSIC

Ministerio francés de Enseñanza Superior e Investigación.

Ese proyecto permite tener en cuenta aspectos técnicos importantes, como la posibilidad de garantizar el acceso a los textos mediante enlaces URL duraderos y aportar soluciones al problema de la conservación a largo plazo de los datos mediante actualizaciones regulares de los ficheros depositados.

Los editores consideran el acceso libre una amenaza para su modelo económico. Tratan de aplazar el depósito en archivos abiertos imponiendo a los autores un embargo de entre seis meses a dos años desde la fecha de publicación, pero les ofrecen también la posibilidad de que el artículo sea de acceso libre desde su publicación si antes pagan por ello. Este modelo se conoce como «híbrido», porque aunque las revistas estén disponibles mediante suscripción, hay artículos que pueden descargarse de forma gratuita. Las revistas de acceso libre han transformado los modelos económicos. Las hay que cargan en los autores los gastos de producción de la revista. Su financiación ya no se lleva a cabo después de la publicación, en forma de suscripción, sino por anticipado, mediante el pago, por parte del autor, de una cantidad concertada para cada artículo aceptado. En general, es una cantidad que subvenciona su institución o el organismo que financia la investigación, que también se ocupa del pago a la revista.

Hoy en día, el reto del acceso libre y de la conservación se extiende a la información obtenida a lo largo del proceso de investigación, como los resultados de experimentos o datos estadísticos. Ello contribuye a la validación de los resultados porque facilita su reproducción por otros equipos, así como el libre acceso del conjunto de investigadores subvencionados con dinero público.

—Christine Berthaud
Centro para la Comunicación Científica Directa del Centro Nacional para la Investigación Científica Villeurbanne

—Agnès Magron
Archivo abierto HAL sobre humanidades y ciencias sociales

PARA SABER MÁS

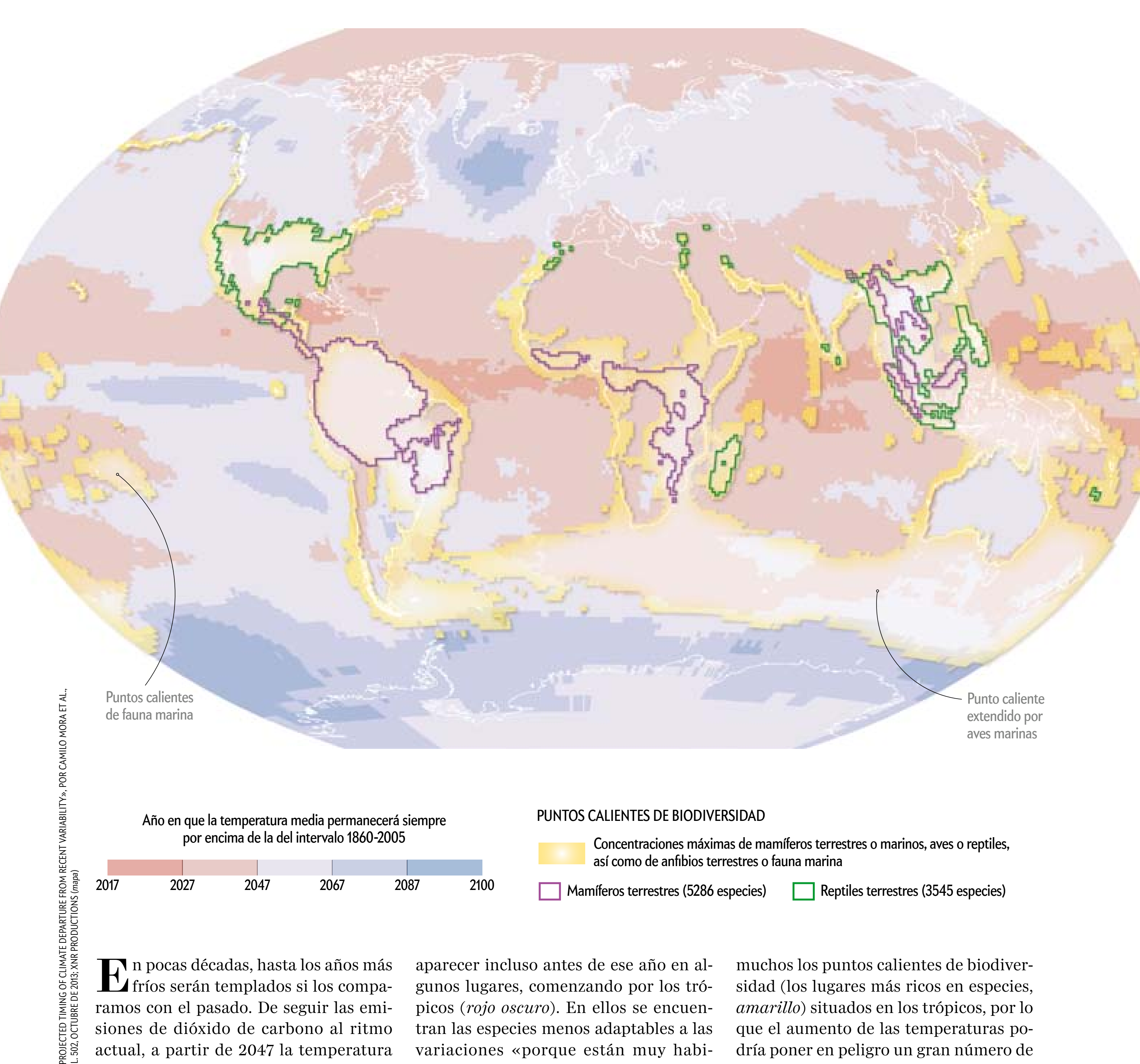
Centro para la edición electrónica abierta **cleo.openedition.org**
Archivo abierto HAL **hal.archives-ouvertes.fr**
Estudio sobre el futuro del acceso abierto liderado por la socióloga Janet Finch **www.researchinfonet.org/publish/finch/wg**

CAMBIO CLIMÁTICO

Amenaza para los puntos calientes de biodiversidad

La fauna tropical será la más afectada por el aumento de las temperaturas

MARK FISCHETTI



FUENTE: «THE PROJECTED TIMING OF CLIMATE DEPARTURE FROM RECENT VARIABILITY», POR CAMILO MORA ET AL., EN *NATURE*, VOL. 502, OCTUBRE DE 2013; XNR PRODUCTIONS (*mapa*)

En pocas décadas, hasta los años más fríos serán templados si los comparamos con el pasado. De seguir las emisiones de dióxido de carbono al ritmo actual, a partir de 2047 la temperatura media de la atmósfera superará la temperatura anual más alta registrada de 1860 a 2005. Esta «nueva anomalía» podría aparecer incluso antes de ese año en algunos lugares, comenzando por los trópicos (*rojo oscuro*). En ellos se encuentran las especies menos adaptables a las variaciones «porque están muy habituadas a un clima constante», asegura el director del estudio Camilo Mora, de la Universidad de Hawái en Manoa. Son muchos los puntos calientes de biodiversidad (los lugares más ricos en especies, *amarillo*) situados en los trópicos, por lo que el aumento de las temperaturas podría poner en peligro un gran número de animales terrestres y marinos a finales de la próxima década.

—Mark Fischetti

ESTADÍSTICA

El valor resbaladizo de *p*

La joya de la corona de la validez estadística no es tan fiable como muchos científicos suponen

REGINA NUZZO

Por un breve momento en 2010, Matt Motyl estuvo a punto de tocar la gloria científica: había descubierto que los extremistas ven literalmente el mundo en blanco y negro.

Los resultados estaban tan «claros como el agua», recuerda Motyl, estudiante de doctorado en psicología en la Universidad de Virginia en Charlottesville. Los datos de un estudio con cerca de 2000 individuos parecían mostrar que las personas con puntos de vista políticos moderados veían tonos de gris de manera más precisa que los extremistas tanto de izquierdas como de derechas. «La hipótesis era *sexy* —comenta Motyl—, y los datos proporcionaban un claro apoyo.» El valor *p*, un índice utilizado comúnmente para determinar la solidez de una prueba estadística, era 0,01 —generalmente interpretado como «muy significativo»—. La publicación en una revista de alto impacto parecía al alcance de Motyl.

Pero entonces la dura realidad hizo presencia. Sensible a las controversias sobre la reproducibilidad de los resultados, Motyl y su director de tesis, Brian Nosek, decidieron repetir el estudio. Con datos adicionales, el valor *p* pasó a ser 0,59, que ni de lejos se acerca al nivel de significación convencional, 0,05. El efecto había desaparecido y con él los sueños juveniles de fama de Motyl.

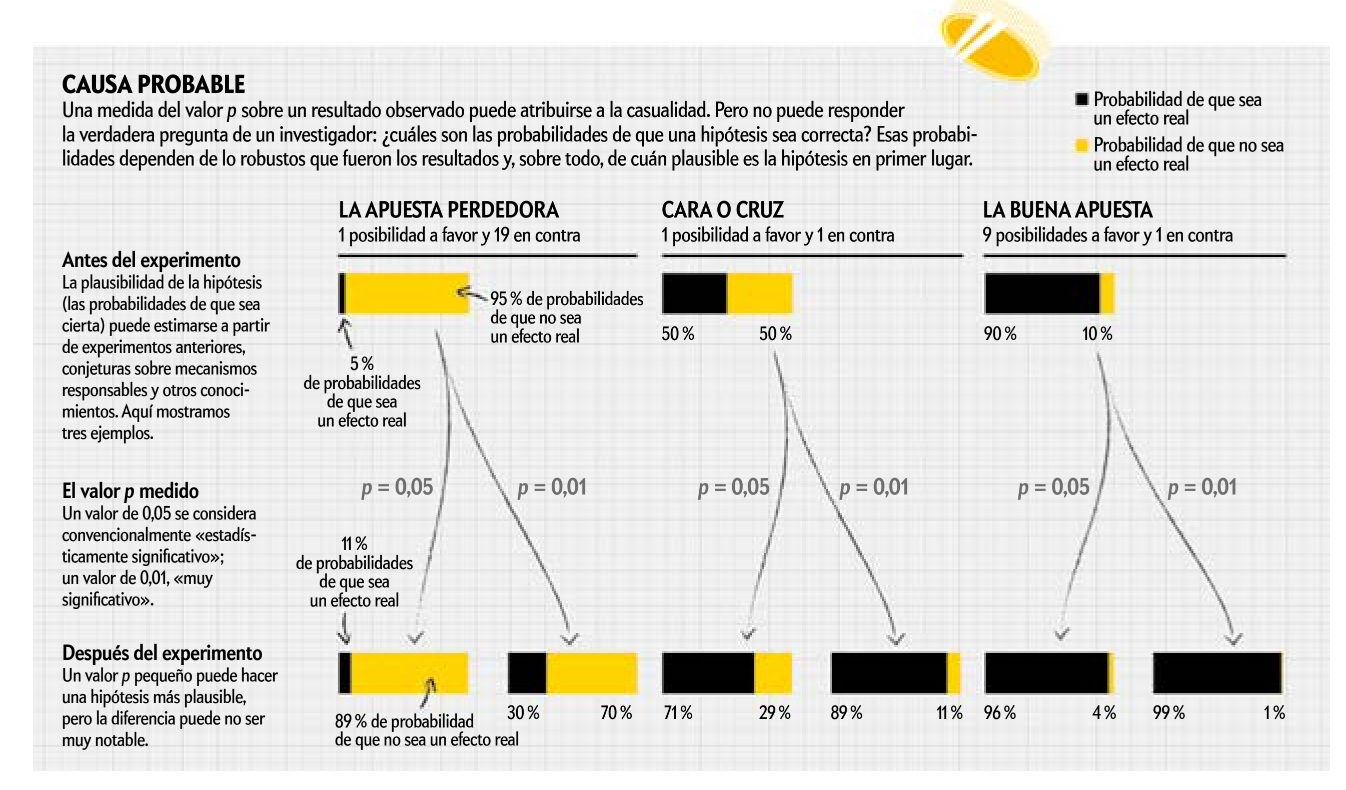
Resultó que el problema no estaba en los datos o en el análisis de Motyl. Se encontraba en la naturaleza sorprendentemente resbaladiza del valor *p*, que no es ni tan fiable ni tan objetivo como la mayoría de los científicos presuponen. «Los valores *p* no están cumpliendo su tarea, porque no pueden», comenta Stephen Ziliak, economista de la Universidad Roosevelt en Chicago, Illinois, y un crítico frecuente de la forma en que se usa la estadística.

Teniendo en cuenta las preocupaciones acerca de la reproducibilidad de los resultados, ello es especialmente preocupante para numerosos investigadores. En 2005, el epidemiólogo John Ioannidis, de la Universidad Stanford, sugirió que la mayor parte de los hallazgos publicados eran falsos; desde entonces, una sucesión de problemas con la replicación de datos experimentales ha obligado a los científicos a repensar la forma en que evalúan los resultados.

Al propio tiempo, los estadísticos están buscando maneras mejores de pensar sobre los datos, para ayudar a los científicos a no perder información importante o a no dar validez a falsas alarmas. «Si cambiamos nuestra filosofía estadística, de repente las cosas importantes cambiarán —asegura Steven Goodman, médico y estadístico de Stanford—. "Leyes" reveladas por Dios dejarán de ser en realidad reveladas por Dios. Serán realmente reveladas por nosotros a nosotros mismos, a través de la metodología que adoptemos.»

Fuera de contexto

Los valores *p* siempre han tenido críticos. En sus casi nueve décadas de existencia, han sido comparados a los mosquitos (molestos e imposibles de espantar), al traje nuevo del emperador (lleno de problemas evidentes que todo el mundo ignora) y a la herramienta de un «intelectual libertino y estéril» que embelesa a la ciencia, pero no proporciona progenie. Un investigador sugirió rebautizar la metodología como



CAUSA PROBABLE
Una medida del valor *p* sobre un resultado observado puede atribuirse a la casualidad. Pero no puede responder la verdadera pregunta de un investigador: ¿cuáles son las probabilidades de que una hipótesis sea correcta? Esas probabilidades dependen de lo robustos que fueron los resultados y, sobre todo, de cuán plausible es la hipótesis en primer lugar.

REGINA UNZO. FUENTE: «CALIBRATION OF P-VALUES FOR TESTING PRECISE NULL HYPOTHESES», POR THOMAS SELLKE, M. J. BAYARRI Y JAMES O. BERGER EN *THE AMERICAN STATISTICIAN*, VOL. 55, PÁGS. 62-71, FEBRERO DE 2001.

«pruebas de inferencia de hipótesis estadísticas» (*statistical hypothesis inference testing*), presumiblemente por el acrónimo que produciría.

Irónicamente, cuando el estadístico británico Ronald Fisher introdujo el valor *p* en los años veinte del siglo xx, no pretendía que fuera un test definitivo. Su intención era simplemente utilizarlo como una manera informal de juzgar si el dato era significativo en el sentido clásico: digno de una segunda mirada. La idea se basaba en realizar un experimento y luego ver si los resultados eran consistentes con lo que el azar podía producir. Los investigadores debían establecer primero la «hipótesis nula» que querían refutar, como que no hay correlación o no hay diferencia entre dos grupos. A continuación, debían hacer de abogado del diablo y, en el supuesto de que esta hipótesis nula fuera verdadera, calcular las posibilidades de obtener resultados al menos tan extremos como el observado en realidad. Esta probabilidad correspondía al valor *p*. Cuanto más pequeño fuera, sugería Fisher, mayor sería la probabilidad de que el hombre de paja, la hipótesis nula, fuera falsa.

A pesar de la aparente precisión de los valores *p*, Fisher los entendía como una parte de un proceso fluido no numérico que mezclaba datos y conocimiento de fondo para alcanzar conclusiones científicas. Pero pronto fueron barridos en un intento por hacer la toma de decisiones basada en la evidencia tan rigurosa y objetiva como fuera posible. Este movimiento fue encabezado a finales de la década de los años veinte por enconados rivales de Fisher, el matemático polaco Jerzy Neyman y el estadístico inglés Egon Pearson, quienes introdujeron un marco alternativo para el análisis de datos que incluía potencia estadística, falsos positivos, falsos negativos y muchos otros conceptos ahora familiares en un curso introductorio de estadística. Excluyeron deliberadamente el valor *p*.

Mientras los rivales se enfrentaban —Neyman calificó matemáticamente algunos de los trabajos de Fisher como «peor que inútiles», Fisher tachó el enfoque de Neyman de «infantil» y «horrible [para] la libertad intelectual en Occidente»—, otros investigadores perdieron la paciencia y comenzaron a escribir manuales de estadística para científicos. Y puesto que muchos de los autores no eran estadísticos y carecían de una comprensión profunda de cualquiera de los enfoques, crearon un sistema híbrido que encajaba el valor *p* de Fisher, fácil de calcular, en el rigurosamente tranquilizador sistema basado en normas de Neyman y Pearson. Este fue el momento en que un valor *p* de 0,05 se consagró como «estadísticamente significativo». «El valor *p* no fue nunca diseñado para ser empleado en la forma en que se utiliza hoy en día», aclara Goodman.

¿Qué significa todo esto?

El resultado actual de este avatar histórico es la existencia de una gran confusión acerca de lo que significa el valor *p*. Considere el estudio de Motyl sobre los extremistas políticos. Muchos científicos mirarían el valor *p* original de 0,01 y dirían que solo había una probabilidad del 1 % de que resultara ser una falsa alarma. Pero estarían equivocados. El valor *p* no puede decir esto: todo lo que puede hacer es sacar una conclusión de los datos asumiendo una hipótesis nula específica. No puede trabajar de manera inversa y hacer declaraciones acerca de la realidad subyacente.

Eso requiere otra pieza de información: las probabilidades de que un efecto real estuviera allí previamente. Ignorar esto sería como despertar con dolor de cabeza y concluir que tienes un tumor cerebral raro; es posible, pero tan poco probable que se requieren muchas más pruebas para reemplazar una explicación cotidiana como una reacción alérgica. Cuanto menos plausible sea una hipótesis (telepatía, extraterrestres, homeopatía), mayor será la probabilidad de que un hallazgo emocionante sea una falsa alarma, al margen del valor *p*.

Se trata de conceptos resbaladizos, pero algunos estadísticos han tratado de proporcionar sencillas reglas de conversión. De acuerdo con un cálculo ampliamente extendido, un valor *p* de 0,01 corresponde a una probabilidad de falsa alarma de al menos un 11 %, según la probabilidad subyacente de que exista un verdadero efecto; un valor *p* de 0,05 alcanza una probabilidad de al menos el 29 %. Así que Motyl encontró una probabilidad de uno en diez de ser una falsa alarma. Del mismo modo, la probabilidad de replicar su resultado original no era del 99 %, como la mayor parte de la gente supone, sino algo más cercano al 73 % —o solo el 50 %, si quería otro resultado «muy significativo»—. En otras palabras, su incapacidad para replicar el resultado es tan sorprendente como si hubiera predicho cara al tirar una moneda y hubiera salido cruz.

Los críticos también se quejan de la forma en que los valores *p* pueden fomentar el pensamiento confuso. El principal ejemplo es su tendencia a desviar la atención del tamaño real de un efecto. En 2013, un estudio realizado con más de 19.000 personas mostró que aquellas que conocieron a su cónyuge en Internet tenían menos probabilidades de divorcio ($p < 0,002$) y más probabilidades de gozar de una alta satisfacción marital ($p < 0,001$) que aquellas que lo conocieron en la vida real (fuera de Internet). La cosa suena impresionante, pero los efectos fueron casi despreciables: conocerse en Internet cambiaba la tasa de divorcio del 7,67 al 5,96 %, y apenas se movió la satisfacción marital del 5,48 al 5,64 en una escala de 7 puntos. Hacer énfasis en valores *p* muy pequeños y pasar por alto la cuestión más amplia es sucumbir a la «seductiva certidumbre de la significación», dice Geoff Cumming, psicólogo emérito de la Universidad La Trobe en Melbourne. Pero la significación no es indicativa de relevancia práctica: «Debemos preguntarnos, "¿Cuánto de un efecto está ahí?", no "¿Hay un efecto?"».

Tal vez la peor falacia al respecto sea una suerte de autoengaño que Uri Simonsohn, psicólogo de la Universidad de Pensilvania, y sus colegas han bautizado y popularizado como *p*-piratería (*p-hacking*); también conocido como dragado de datos, espionaje chapucero, pesca, caza de significancia y doble inmersión. «La *p*-piratería —aclara Simonsohn— consiste en intentar un montón de cosas hasta que se alcanza el resultado deseado», aunque se realice de forma inconsciente. Puede convertirse en el primer término estadístico en alcanzar una definición en el diccionario en línea *Urban Dictionary*, donde los ejemplos de uso serían del tipo: «Este hallazgo parece haber sido obtenido a través de *p*-piratería, los autores se saltaron la condición de que el valor *p* debía ser menor que 0,05» o «Ella es una *p*-pirata; siempre monitoriza los datos mientras se están recopilando».

Ese tipo de prácticas tienen el efecto de convertir descubrimientos a partir de estudios exploratorios —que deberían ser tratados con escepticismo— en lo que parecen ser confirmaciones, pero que se desvanecen al intentar replicarlos. Simulaciones realizadas por Simonsohn muestran que cambios en las decisiones tomadas sobre unos pocos datos pueden aumentar un 60 % la tasa de falsos positivos en un solo estudio. La *p*-piratería es especialmente probable, dice, en el escenario actual de estudios que persiguen pequeños efectos escondidos en datos con ruido. Es difícil de precisar cuán ampliamente está extendido el problema, pero Simonsohn tiene la

sensación de que la cosa es grave. En un estudio, encontró indicios de que en muchos artículos de psicología los valores *p* reportados se agrupaban sospechosamente alrededor de 0,05, tal como se esperaría si los investigadores «pescaran» valores *p* significativos hasta encontrar uno.

Juego de números

A pesar de las críticas, el cambio ha sido lento. «El marco básico de la estadística ha permanecido virtualmente inalterado desde que Fisher, Neyman y Pearson lo presentaran», dice Goodman. John Campbell, psicólogo de la Universidad de Minnesota en Minneapolis, se lamentó del tema en 1982, cuando fue redactor de *Journal of Applied Psychology*: «Es casi imposible que los autores se suelten de sus valores *p*, y cuantos más ceros haya después del punto decimal, más fuerte se agarran a ellos». En 1989, cuando Kenneth Rothman, de la Universidad de Boston en Massachussets, lanzó la revista *Epidemiology*, hizo todo lo posible para desalentar el uso de los valores *p* en sus páginas. Pero al dejar la revista en 2001, los valores *p* volvieron a resurgir.

Ioannidis está analizando la base de datos PubMed para obtener una visión de cómo los autores de diversos campos están utilizando los valores *p* y otras pruebas estadísticas. «Una mirada superficial a una muestra de artículos publicados recientemente —dice— nos convencerá de que los valores *p* son todavía muy, muy populares.»

Cualquier reforma al respecto se enfrenta al difícil cambio de una cultura muy arraigada. Tendría que cambiar la manera de enseñar estadística, la forma de ejecutar los análisis de datos y el modo en que se comunican e interpretan los resultados. Pero, al menos, los investigadores están admitiendo que tienen un problema, señala Goodman. «La llamada de atención es que muchos de nuestros descubrimientos no son ciertos.» El trabajo de expertos como Ioannidis muestra la relación entre las quejas de los teóricos de la estadística y las dificultades reales. «Los problemas que los estadísticos han predicho son exactamente los que ahora estamos viendo. No sabemos todavía cómo arreglarlo», añade Goodman.

Los estadísticos apuntan varias medidas que podrían ayudar. Entre ellas, evitar la trampa de pensar acerca de los resultados como significativos o no significativos. Cumming piensa que los investigadores deberían siempre reportar el efecto de los tamaños y los intervalos de confianza. Estos últimos transmiten lo que un valor *p* no puede: la magnitud y la importancia relativa de un efecto.

Muchos estadísticos también abogan por sustituir el valor *p* por métodos que adopten las ventajas de la regla de Bayes: un teorema del siglo XVIII que describe la forma de pensar acerca de la probabilidad como la plausibilidad de un resultado, en lugar de como la frecuencia potencial del mismo. Ello implica cierta subjetividad, algo que los pioneros de la estadística trataron de evitar. Pero el marco bayesiano facilita las cosas a los observadores, a la hora de incorporar en sus conclusiones lo que saben sobre el mundo y de calcular cómo cambian las probabilidades a medida que surgen nuevos datos.

Otros abogan por un enfoque más ecuménico y alientan a los investigadores a utilizar múltiples métodos sobre el mismo conjunto de datos. Stephen Senn, estadístico del Centro de Investigación en Salud Pública en la ciudad de Luxemburgo, compara la situación con la de un robot de limpieza que no puede encontrar el camino para salir de una esquina: cualquier método de análisis de datos topará finalmente con una pared, y se necesitará cierto sentido común para que el proceso siga moviéndose. Si métodos diferentes proporcionan respuestas distintas, «eso es un acicate para ser más creativo y tratar de encontrar el porqué», lo que debería conducir a una mejor comprensión de la realidad subyacente.

Simonsohn sostiene que una de las protecciones más sólidas para los científicos es confesarlo todo. Anima a los autores a marcar sus artículos con un «*p*-certificado, *p*-no pirateado» mediante las palabras: «Describimos el modo en que hemos determinado el tamaño de la muestra, todas las exclusiones de datos (si las hubiere), todas las manipulaciones y todas las medidas en el estudio». Espera que esta advertencia desaliente a la *p*-piratería o, al menos, alerte a los lectores sobre cualquier picaresca y les permita enjuiciarla en consecuencia.

Otra idea que está atrayendo la atención es el análisis en dos etapas, o replicación prerregistrada, comenta el experto en ciencias políticas y estadístico Andrew Gelman, de la Universidad de Columbia en Nueva York. En este enfoque, los análisis exploratorios y de confirmación se abordan de manera diferente y se etiquetan con claridad. En vez de llevar a cabo cuatro estudios pequeños por separado y presentar los resultados en un artículo, por ejemplo, los investigadores deberían primero realizar dos estudios exploratorios pequeños y recopilar hallazgos potencialmente interesantes sin preocuparse demasiado por falsas alarmas. Luego, sobre la base de estos resultados, deberían planear la confirmación de los hallazgos y prerregistrar públicamente sus intenciones en una base de datos como la Open Science Framework (https://osf.io). Entonces deberían realizar estudios de replicación y publicar los resultados junto con los de los estudios exploratorios. Este enfoque nos permite libertad y flexibilidad en los análisis, dice Gelman, al tiempo que proporciona suficiente rigor para reducir el número de falsas alarmas que puedan publicarse.

En términos más generales, los investigadores tienen que darse cuenta de los límites de la estadística convencional, advierte Goodman. En su lugar, deberían incorporar en los análisis elementos de juicio científico sobre la verosimilitud de una hipótesis y las limitaciones del estudio que normalmente se destierran a la sección de discusión: los resultados de experimentos idénticos o similares, los mecanismos propuestos, el conocimiento clínico y así sucesivamente. El estadístico Richard Royall, de la Escuela Johns Hopkins Bloomberg de Salud Pública en Baltimore, Maryland, dijo que hay tres cuestiones que un científico probablemente quiera preguntar después de un estudio: «¿Cuál es la prueba?», «¿Qué debo creer?» y «¿Qué debo hacer?». Un método no las puede responder todas, dice Goodman: «Los números marcan el inicio de la discusión científica, no el fin».

—Regina Nuzzo
Profesora asociada de estadística en la Universidad de Gallaudet en Washington DC.

Artículo original publicado en *Nature* 506, págs. 150-152, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

Towards evidence-based medical statistics. 1: The P value fallacy. Steven N. Goodman en *Annals of Internal Medicine*, vol. 130, págs. 995-1004, junio de 1999.
Why most published research findings are false. John P. A. Ioannidis en *PloS Medicine*, vol. 2, e124, agosto de 2005.
False-positive psychology: undisclosed flexibility in data collection and analysis allow presenting anything as significant. J. P. Simmons, L. D. Nelson y U. Simonsohn en *Psychological Science*, vol. 22, págs. 1359-1366, 2011.



LA FÓRMULA DE LA INCLUSIÓN

La ciencia y la tecnología son los principales motores de la sociedad. ¿Quién los impulsa?

Fred Guterl

LA COLABORACIÓN ENTRE INVESTIGADORES viene siendo habitual en ciencia y tecnología en los últimos años. La vida intelectual tiene un carácter cada vez más transnacional. Circula por los centros de excelencia de todos los continentes, interconectados por comunicaciones de gran velocidad y alcance. En nuestros informes *El estado de la ciencia global* hemos tratado el tema de la colaboración en dos ocasiones; el año pasado lo enfocamos en la innovación y, el anterior, en la investigación básica. Esta vez lo abordamos centrándonos en las personas.

El término *diversidad* es la forma abreviada con la que nos referimos al gran esfuerzo que supone reformar la sociedad, para que todas las personas —no solo los privilegiados— tengan acceso a la vida política, la cultura y la búsqueda de la felicidad. Puesto que se trata de un tema demasiado ambicioso para abarcarlo en este informe, nos hemos ceñido al campo de la ciencia y sus actividades. Como sentimos predilección por los datos y las pruebas, aprovechamos esta oportunidad para centrarnos en las bases empíricas de la diversidad, que a menudo se pierden en los debates más generales.

Se ha comprobado que la pluralidad resulta fundamental para que la investigación y la innovación avancen con eficacia. En la bibliografía queda claro que se asocia a calidad y eficacia de

EDEL RODRIGUEZ

los equipos de trabajo. Katherine W. Phillips nos explica en su artículo [*véase* «Beneficios de la diversidad social», *en este mismo número*] que, cuando colaboramos con personas que no son como nosotros, solemos trabajar con ahínco y prepararnos más a fondo a la hora de poner en orden nuestros argumentos; como consecuencia, obtenemos mejores resultados. La diversidad beneficia a los equipos precisamente porque reaccionamos de forma distinta cuando tratamos con personas diferentes a nosotros. Si el objetivo final es la excelencia, la diversidad constituye un ingrediente esencial.

Pero para que resulte ventajosa, el entorno laboral debe ser el adecuado. Los individuos han de realizar un esfuerzo consciente para vigilar sus prejuicios inconscientes y superarlos; y las organizaciones deben establecer procedimientos y un etos de aceptación. Victoria Plaut explica en páginas posteriores [*véase* «Todo el mundo es bienvenido»] que los grupos que abandonan las políticas que ignoran la variedad racial y acogen las diferencias entre sus miembros, sin estereotipos ni encasillamientos, suelen sacar provecho de lo que la diversidad les ofrece.

Desde luego, en este informe especial no tratamos la diversidad tan solo como una cuestión utilitaria. La ciencia impone la disciplina de formar equipos de individuos diferentes entre sí para encontrar las mejores ideas, lo que otorga a los científicos e ingenieros la oportunidad de ser pioneros del cambio cultural. En esta selección presentamos ensayos de algunas personas extraordinarias que acogen ese desafío.

Nos habría gustado incluir un «índice de diversidad» para estimar cómo les va en los diferentes países, en lo que se refiere a integración, a quienes se dedican a la ciencia y la tecnología; no obstante, en este momento resulta casi imposible. Constituye un avance positivo que dos de las empresas de tecnología más conocidas del mundo, Google y Apple, hayan publicado datos recientes sobre diversidad, o la falta de ella, en sus respectivas plantillas. Sin embargo, representan una gota en el océano de la información. En general, los datos escasean por distintas razones.

Una de ellas es que las identidades racial y étnica siempre son difíciles de definir. Un censo de Naciones Unidas reveló que dos de cada tres países clasifican a su población siguiendo estas categorías, pero mezclan varios términos: raza, etnia, nacionalidad, genealogía, tribu, grupo aborigen y otros. En cuanto a los pobres y desfavorecidos, muchos países llevan un seguimiento de estas categorías, pero su significado varía de un lugar a otro. La discapacidad resulta incluso más complicada de precisar. El sexo se determina con mayor facilidad —si bien también en esta categoría existen ambigüedades—, pero se recoge poca información específica sobre los científicos en concreto. «No existen datos exhaustivos, comparados a escala internacional, sobre las plantillas de científicos e ingenieros en el mundo», apunta la Fundación Nacional para la Ciencia en su informe *Science and Engineering Indicators 2014* («Indicadores de Ciencia e Ingeniería 2014»). Sin embargo, indudablemente podemos hacer mucho más de lo que hacemos.

A tal fin, creemos que debería concederse una alta prioridad a los datos. Los investigadores se enorgullecen de su objetividad, pero la experiencia personal y el punto de vista tienen mucho que ver con las preguntas que estos se formulan en primer lugar y las estrategias que plantean para contestarlas. Los científicos e ingenieros impulsan el motor de prosperidad para el mundo y nuevas ideas. Pero ¿quiénes son?

***Fred Guterl** es editor ejecutivo de* Scientific American

¿DÓNDE ESTÁN LOS DATOS?

Las cifras mundiales sobre diversidad social en las plantillas de científicos e ingenieros son difíciles de obtener, pero lo que sabemos no resulta halagüeño

EL NÚMERO DE PERSONAS dedicadas a la ciencia se ha incrementado. China declara que triplicó el número de investigadores entre 1995 y 2008, y esta cifra sigue aumentando; en Corea del Sur se duplicó entre 1995 y 2006 y continúa su tendencia al alza. Incluso Estados Unidos y Europa han presentado incrementos. La plantilla de científicos creció un 36 por ciento en Estados Unidos entre 1995 y 2007, y un 65 por ciento en Europa entre 1995 y 2010. Las excepciones son Japón, donde se mantiene estable, y Rusia, que ha perdido efectivos. En cuanto a diversidad, sin embargo, todo lo que tenemos es una radiografía general. Mostramos a continuación un resumen del diagnóstico.

PARA SABER MÁS

Science and Engineering Indicators 2014. Consejo Nacional de Ciencia. Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU., 2014. **www.nsf.gov/statistics/seind14/index.cfm/home**

Picture of the UK scientific workforce: Diversity data analysis for the Royal Society. Real Sociedad británica, 2014. **https://royalsociety.org/policy/projects/leading-way-diversity/uk-scientific-workforce-report**

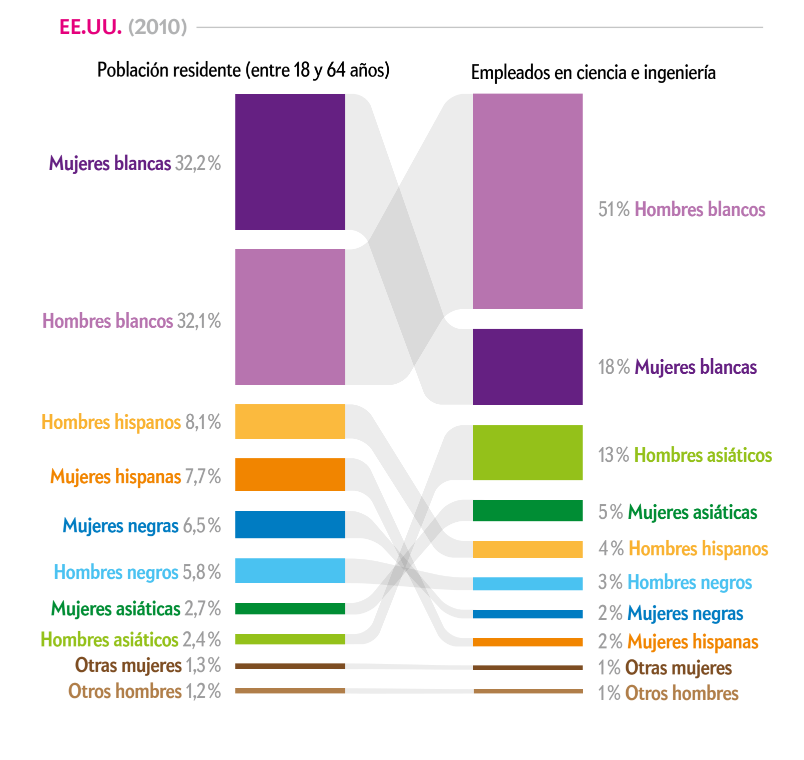
Women, minorities, and persons with disabilities in science and engineering. Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. **http://nsf.gov/statistics/wmpd/2013**

Información sobre las mujeres en la ciencia del Instituto de Estadística de la UNESCO. **http://www.uis.unesco.org/ScienceTechnology/Pages/gender-and-science.aspx**

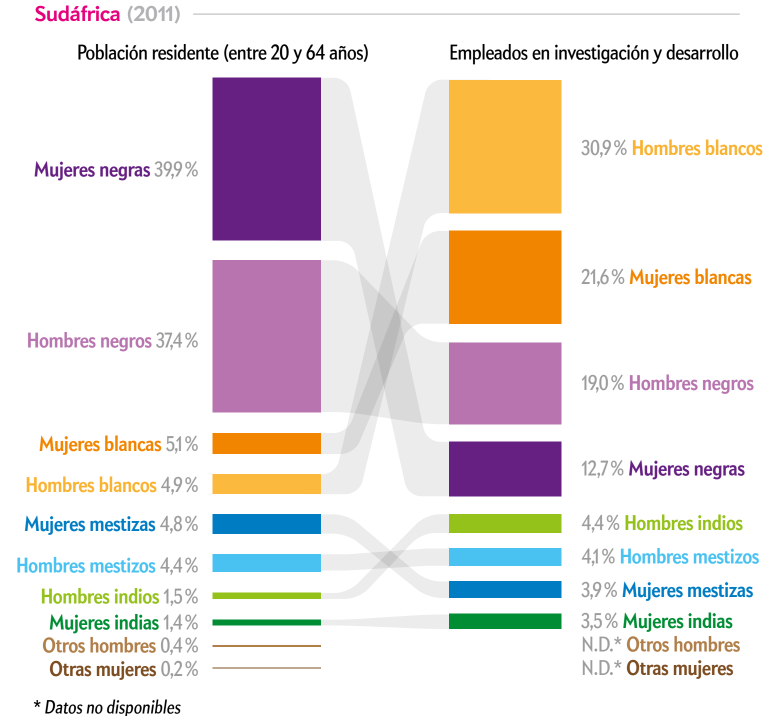
FUENTES: *WOMEN, MINORITIES, AND PERSONS WITH DISABILITIES IN SCIENCE AND ENGINEERING: 2013*. CENTRO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS SOBRE CIENCIA E INGENIERÍA. FUNDACIÓN NACIONAL PARA LA CIENCIA, 2013 (*datos demográficos, laborales y de discapacitados en EE.UU.*); *CENSUS 2011: CENSUS IN BRIEF*. SERVICIO DE ESTADÍSTICA DE SUDÁFRICA, 2012 (*datos demográficos de Sudáfrica*); *SOUTH AFRICAN NATIONAL SURVEY OF RESEARCH AND EXPERIMENTAL DEVELOPMENT: STATISTICAL REPORT 2011/12*. CENTRO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INDICADORES DE INNOVACIÓN Y CONSEJO DE INVESTIGACIÓN DE CIENCIAS HUMANAS DE SUDÁFRICA, MARZO DE 2014 (*datos laborales de Sudáfrica*); MUJERES EN CIENCIA. INSTITUTO DE ESTADÍSTICA DE LA UNESCO (*proporción de sexos*); *LEADING THE WAY: INCREASING THE DIVERSITY OF THE SCIENCE WORKFORCE: PROJECT TWO: EXPLORING THE IMPACT OF SOCIO-ECONOMIC BACKGROUND ON CAREERS IN SCIENCE*. TRENDS BUSINESS RESEARCH, REAL SOCIEDAD BRITÁNICA, 2013 (*datos socieconómicos*)

Raza y etnia: La mayoría de los cuestionarios censales clasifican a sus poblaciones por etnia o nacionalidad. Pero las definiciones varían mucho de un país a otro. Sudáfrica, por ejemplo, utiliza la categoría «mestizo» (*coloured*) para identificar la raza mixta de europeos, asiáticos y miembros de tribus locales. Cuando existe información, por lo general pertenece a encuestas demográficas más amplias; ninguna está enfocada en datos de educación o empleo en ciencia e ingeniería. Pocos países contabilizan la participación de las minorías en campos relacionados con la ciencia.

EE.UU. (2010)



Sudáfrica (2011)



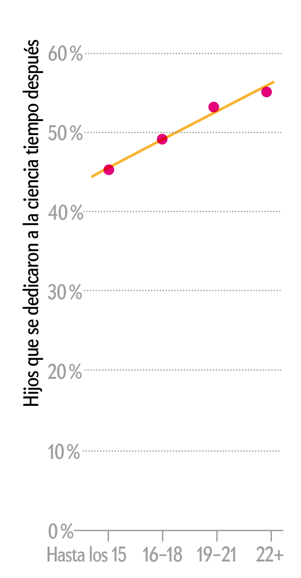
* *Datos no disponibles*

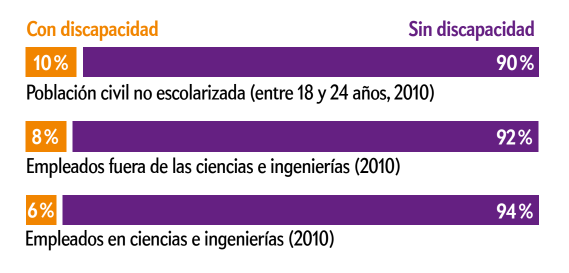
Empleados en ciencia por regiones (datos de 2010 o posteriores)

Mujeres	Hombres	
20 %	80 %	Este asiático, Pacífico
20 %	80 %	Sur y oeste asiáticos
29 %	71 %	África subsahariana
32 %	68 %	Norteamérica/Europa occidental
38 %	62 %	Estados árabes
40 %	60 %	Europa central y oriental
44 %	56 %	Latinoamérica y Caribe
46 %	54 %	Asia central

Sexo: Es la categoría de diversidad más citada en relación a la educación y el empleo en ciencia e ingeniería, simplemente porque la mayoría de los países contabilizan a hombres y mujeres (aunque no a personas transgénero). En promedio, las mujeres están infrarrepresentadas en los campos de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. Para más información, véanse las gráficas comparativas de doctorados obtenidos por hombres y mujeres en las páginas 28 y 29.

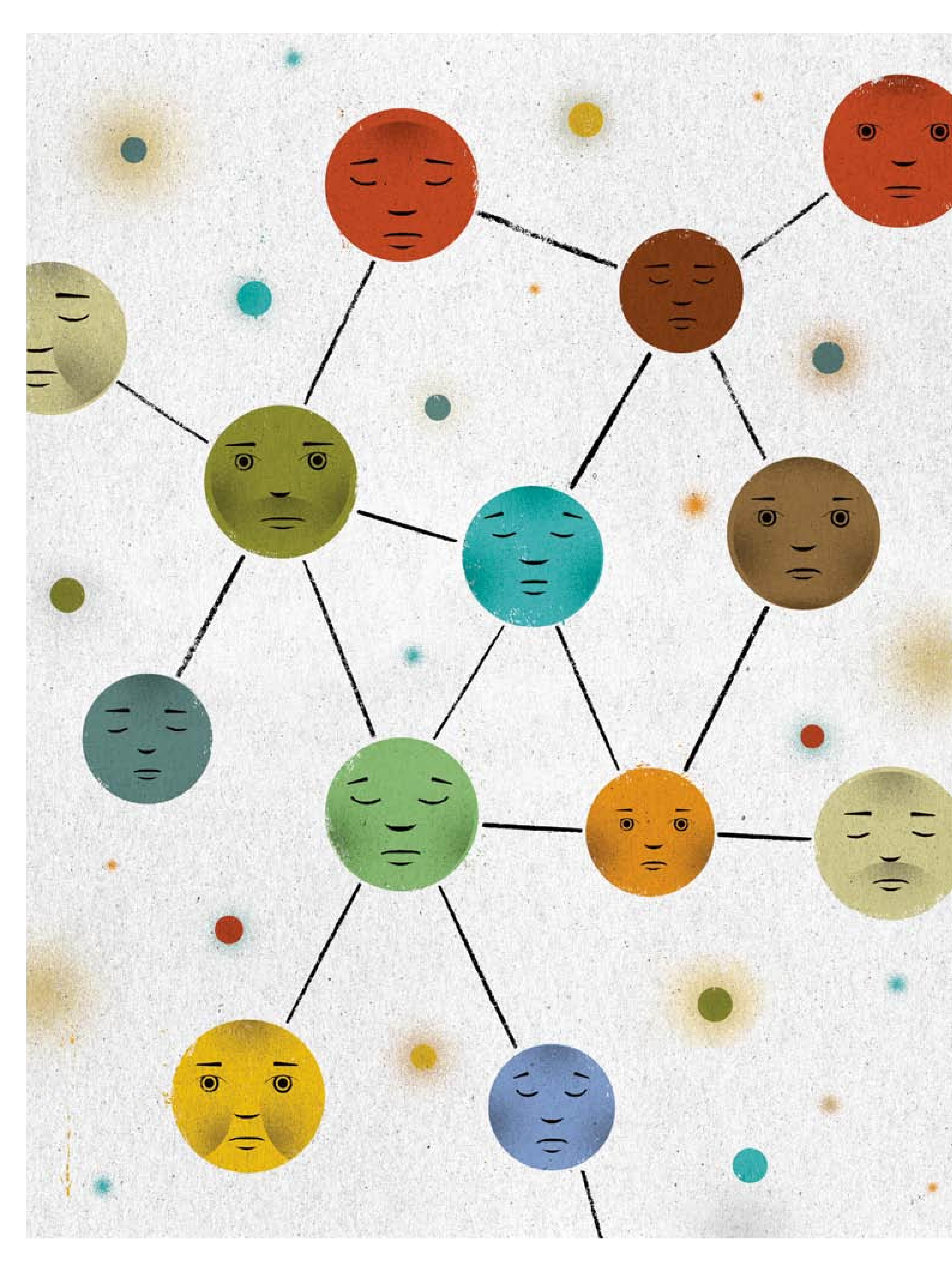
Nivel socioeconómico: Un informe reciente de la Real Sociedad británica analizó datos sobre las plantillas de investigadores e ingenieros del Reino Unido. Descubrió una fuerte correlación entre el nivel socioeconómico y la elección de carreras relacionadas con la ciencia. «Cuanto más alto es el nivel socioeconómico de un individuo, evaluado según la clase social y la educación de sus padres, más probable es que se dedique a la ciencia.» La relación era «tan fuerte que se podía describir como un gradiente, del mismo modo que suele describirse en la bibliografía la relación entre el nivel socioeconómico de un niño y su rendimiento académico».





Discapacidades: Los datos sobre la representatividad de las personas con discapacidad son difíciles de precisar y, por tanto, de evaluar y comparar a escala mundial. Para complicar la cuestión, la discapacidad puede ser de nacimiento o adquirida en algún momento de la vida de la persona. Con independencia del momento en el que se adquirió la discapacidad, este colectivo está infrarrepresentado en el mundo de la ciencia y la ingeniería, en comparación con la población total.

JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*); AMANDA HOBBS (*investigación*)



BENEFICIOS DE LA DIVERSIDAD SOCIAL

Rodearnos de personas diferentes a nosotros nos hace más creativos, diligentes y trabajadores

Katherine W. Phillips

Katherine W. Phillips es profesora Paul Calello de liderazgo y ética, y vicedecana de la Escuela de Negocios de la Universidad de Columbia.

LO PRIMERO QUE HAY QUE ASUMIR sobre la diversidad son las dificultades que conlleva. En EE.UU., donde el diálogo acerca de la inclusión se halla bastante avanzado, la sola mención de la palabra *diversidad* puede crear ansiedad y conflictos. Los jueces de la Corte Suprema de EE.UU. discrepan sobre sus virtudes y sobre los medios para alcanzarla. Las corporaciones emplean miles de millones de dólares en atraerla y gestionarla tanto interna como externamente; con todo, siguen enfrentándose a denuncias por discriminación; y en las listas mundiales de líderes empresariales continúa predominando el varón blanco.

Es razonable preguntarse qué nos aporta de positivo la diversidad. La colaboración de especialistas de distintos ámbitos conlleva, sin duda, beneficios obvios. No se nos ocurriría construir un modelo nuevo de coche sin ingenieros, diseñadores y expertos en control de calidad. Pero ¿qué sucede con la diversidad social? ¿Cuáles son las bondades de la variedad por lo que respecta a la raza, etnia, sexo y orientación sexual? Los estudios han demostrado que, dentro de un grupo, la diversidad puede generar incomodidad, interacciones más desabridas, falta de confianza, percepción de un mayor conflicto interpersonal, menor comunicación, menos cohesión y más inquietud por las faltas de respeto, entre otros problemas. Entonces, ¿cuál es el lado positivo?

EN SÍNTESIS

Décadas de investigaciones de científicos, psicólogos, sociólogos, economistas y demógrafos demuestran que los grupos socialmente mixtos (con varias razas, etnias, sexos y orientaciones sexuales) son más innovadores que los homogéneos.

Parece lógico pensar que un equipo con especialistas en diferentes campos resolverá mejor los problemas complejos y novedosos que uno homogéneo. Resulta menos obvio que la diversidad social funcione de la misma manera; sin embargo, los datos indican que es así.

Ello no se debe tanto a que las personas con diferentes características aporten información nueva. La sola interacción con individuos que son distintos fuerza al grupo a prepararse mejor, a anticipar puntos de vista alternativos y a prever un mayor esfuerzo a la hora de alcanzar el consenso.

ILUSTRACIONES DE EDEL RODRIGUEZ

El hecho es que, para formar equipos o crear organizaciones capaces de innovar, se necesita diversidad. Se ha visto que fomenta la creatividad, la búsqueda de información y la adopción de nuevas perspectivas, lo que mejora la toma de decisiones y la resolución de problemas. La pluralidad puede incrementar los beneficios de una empresa y dar lugar a descubrimientos poco convencionales y a ideas revolucionarias. Incluso puede cambiar nuestra manera de pensar. No solo se trata de buenos deseos; es la conclusión a la que hemos llegado tras analizar décadas de estudios llevados a cabo por científicos, psicólogos, sociólogos, economistas y demógrafos dentro de distintas organizaciones.

INFORMACIÓN E INNOVACIÓN

La clave para entender las ventajas de la pluralidad reside en el concepto de diversidad informativa. Cuando un grupo se reúne para resolver problemas, aporta datos, opiniones y perspectivas diferentes. Ello cobra un sentido evidente cuando hablamos de diversidad de disciplinas: pensemos de nuevo en el equipo interdisciplinario que construye el coche. La misma lógica se aplica a la diversidad social. Las personas que se diferencian en raza, sexo u otra categoría proporcionan información y experiencias únicas y valiosas a la tarea que haya que realizar. Un ingeniero puede tener perspectivas tan diferentes de las de una ingeniera como las que pueda tener de un físico; y ello resulta provechoso.

Así se ha demostrado en repetidas ocasiones en las organizaciones grandes e innovadoras. Los profesores Cristian Deszö, de la Universidad de Maryland, y David Ross, de la Universidad de Columbia, estudiaron el efecto de la proporción entre sexos en las mayores empresas sobre el índice Standard & Poor 1500, elaborado para reflejar el mercado general de valores estadounidense. Primero, examinaron el tamaño y la composición por sexos de los equipos directivos de alto nivel de las empresas entre 1992 y 2006; luego, observaron los resultados financieros de esas compañías. Observaron que, en promedio, la presencia femenina en la alta dirección incrementaba en 42 millones de dólares el valor de la empresa. También evaluaron la «intensidad innovadora» de las compañías basándose en el cociente entre el gasto en investigación y desarrollo y sus activos. Descubrieron que las que priorizaban la innovación consiguieron mayores ganancias cuando había mujeres en los niveles más altos de dirección.

La diversidad racial puede aportar el mismo tipo de beneficios. Orlando Richard, profesor de gestión de la Universidad de Texas en Dallas, y sus colaboradores encuestaron, en 2003, a 177 ejecutivos de bancos nacionales estadounidenses. Crearon una base de datos comparativa sobre los resultados financieros, la diversidad racial y la importancia que los presidentes de los bancos otorgaban a la innovación. En los bancos innovadores, el aumento de la diversidad racial guardaba una clara relación con la mejora de los datos económicos.

Fuera de EE.UU., también se han demostrado las ventajas de la diversidad. En agosto de 2012, un equipo del Instituto de Investigación del banco Credit Suisse publicó un informe en el que analizaba 2360 compañías mundiales entre 2005 y 2011. En él se exploraba la relación entre la diversidad de sexos en los

PUNTOS DE VISTA PARTICULARES

Douglas Medin, Carol D. Lee y Megan Bang

Productividad y equidad son tal vez las razones que más invoca la ciencia para prestar atención a la diversidad social. Sin embargo, la cultura y el sexo de los científicos también resultan relevantes. Influyen en lo que elegimos estudiar, en nuestra perspectiva cuando abordamos cuestiones científicas y en las estrategias que usamos para estudiarlas. Cuando entramos en el mundo de la ciencia, no dejamos atrás nuestra identidad cultural.

La biología evolutiva es un ejemplo de ello. A pesar de las imágenes tan conocidas de Jane Goodall observando a los chimpancés, casi todas las primeras investigaciones sobre el comportamiento de los primates fueron realizadas por hombres. Los primatólogos varones, en general, adoptaron el punto de vista de la biología evolutiva de Charles Darwin y se centraron en la competencia entre los machos para aparearse. Desde este punto de vista, las hembras primates son pasivas y, o bien el macho ganador tiene acceso a todas ellas, o estas eligen, sin más, al macho más poderoso.

La idea de que las hembras podían desempeñar un papel activo o, incluso, tener relaciones sexuales con varios machos, no se consideró hasta que las biólogas comenzaron a hacer observaciones de campo. ¿Por qué vieron lo que se les escapó a los varones? «Si una hembra de lémur o bonobo domina a un macho, o una hembra de langur abandona su grupo para ofrecerse a machos desconocidos, una investigadora de campo tenderá a seguirla, observarla y hacerse preguntas, en vez de considerar fortuita tal conducta», escribió la antropóloga Sarah Hrdy. Su interés por las estrategias reproductoras maternas surgió de su empatía con las hembras que estudiaba.

La cultura a la que pertenecen los investigadores también marca diferencias de enfoque. En los años treinta y cuarenta, los primatólogos estadounidenses se centraron en la dominación masculina y su conducta asociada de apareamiento. Prestaron escasa atención al individuo, excepto para trazar las jerarquías de dominación; pocas veces se siguió el rastro de individuos o grupos durante varios años. Los investigadores japoneses, por el contrario, se fijaron mucho más en la posición y las relaciones sociales, valores con mayor importancia en la sociedad japonesa. Esta perspectiva distinta dio lugar a diferencias sorprendentes en el enfoque de cada investigación. Los japoneses descubrieron que el rango de los machos tan solo era uno de los factores que determinaban las relaciones sociales y la composición del grupo. Hallaron que las hembras también tenían un rango y que el núcleo estable del grupo se componía de linajes de hembras emparentadas, y no de machos. Sus estudios a largo plazo revelaron también que mantener el estatus de macho alfa no dependía solamente de la fuerza física.

La diversidad ha influido también en los trabajos sobre educación y ciencias sociales. Lawrence Kohlberg fue muy reconocido por su obra sobre las etapas del desarrollo moral en los niños a principios de los años setenta. Tiempo después, la psicóloga Carol Gilligan cuestionaría su trabajo argumentando que ignoraba la perspectiva de las mujeres, quienes tendían a enfatizar la ética de la compasión y el cuidado de los demás. El modelo de Kohlberg tampoco tenía en cuenta los principios morales asociados a las tradiciones de las religiones orientales, en parte porque su visión no incluía principios de cooperación y no violencia.



consejos de administración de empresas y sus resultados financieros. Se descubrió que las compañías con una o más mujeres en los consejos obtenían una mayor rentabilidad económica media, un menor apalancamiento (relación entre la deuda neta y el capital) y un mayor promedio de crecimiento.

LA DIVERSIDAD DA QUÉ PENSAR

Los estudios que analizan grandes conjuntos de datos adolecen de una limitación obvia: si bien demuestran que la diversidad mejora el rendimiento, no explican las causas de esa mejora. Sin embargo, las investigaciones sobre diversidad racial en grupos pequeños permiten extraer algunas conclusiones causales que, de nuevo, no dejan lugar a dudas: la pluralidad favorece a las organizaciones que valoran la innovación y las ideas novedosas.

En 2006, junto con Margaret Neale, de la Universidad Stanford, y Gregory Northcraft, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, analizamos el impacto de la diversidad racial en la toma de decisiones en grupos pequeños. Llevamos a cabo un experimento con estudiantes de administración de empresas de la Universidad de Illinois. Los dividimos en dos tipos de grupos: unos estaban formados por tres miembros blancos y, los otros, por dos blancos y uno de otra raza. El ejercicio consistía en resolver el misterio de un asesinato. Hicimos que todos los integrantes de un grupo compartieran cierta información, pero también proporcionamos distintas pistas importantes a cada uno de ellos por separado. Para descubrir quién había cometido el crimen, los participantes debían compartir la información que poseían con el resto de su grupo. El experimento demostró que los grupos con diversidad racial superaron con creces a los homogéneos. Convivir con personas parecidas a nosotros nos lleva a pensar que todos poseemos la misma información y tenemos el mismo punto de vista. La idea de que existe una perspectiva común entorpece la creatividad y la innovación.

Otros investigadores han obtenido resultados similares. En 2004, Anthony Lising Antonio, de la Escuela de Posgrado de Educación en Stanford, y sus colaboradores examinaron la influencia de la diversidad de raza y de opinión en debates de grupos pequeños. Más de 350 estudiantes de tres universidades participaron en el estudio. Se pidió a los grupos que discutieran sobre un tema social actual (el trabajo infantil o la pena de muerte) durante quince minutos. Los investigadores prepararon opiniones discrepantes y se las entregaron a algunos participantes para que las aportaran al debate. Cuando un estudiante negro contribuía con una opinión disconforme al grupo de blancos, esta se percibía como más novedosa, suscitaba mayor reflexión y se le buscaban más alternativas que si quien lo hacía era blanco. En conclusión, si alguien es diferente de nosotros, sus perspectivas discordes nos provocan mayor reflexión que si se nos asemeja.

Tal efecto no se limita a la raza. El año pasado, junto con los profesores de gestión Denise Lewin Loyd, de la Universidad de Illinois, Cynthia Wang, de la Universidad estatal de Oklahoma, y Robert B. Lount, Jr., de la Universidad estatal de Ohio, realizamos un experimento con 186 personas. Les preguntamos si se identificaban como demócratas o republicanos y les hicimos leer un relato sobre un crimen y adivinar quién había cometido el asesinato. Después, les pedimos que escribieran sus conclusiones y a continuación las discutieran con otra persona del grupo. Y lo que es más importante, en todos los casos les indicábamos que su compañero discreparía de su opinión y que era obligatorio llegar a un acuerdo. Todos debían prepararse para persuadir al oponente sobre su postura. Sin embargo, a la mitad de ellos se les dijo que habían de convencer a un simpatizante del partido contrario, y a la otra mitad, que su adversario simpatizaba con su propio partido.

El resultado fue que los demócratas que creían que otro demócrata

La validez en las ciencias va mucho más allá de respetar los cánones habituales, como la necesidad de grupos de control adecuados o la reproducibilidad de los resultados. Implica decidir sobre qué problemas y poblaciones estudiar y qué procedimientos y mediciones realizar. Las perspectivas y valores son importantes a la hora de tomar estas decisiones. Los programas de investigación llevados a cabo por científicos blancos y de clase media están dirigidos, en su mayor parte, a poblaciones de su propia raza y clase social. Un sesgo que puede conducir a conclusiones no generalizables.

Las prácticas culturales, esenciales para nuestro desarrollo como humanos, influirán en nuestro modo de aprender y ejercer la ciencia. En psicología, los investigadores que se han centrado en los aspectos culturales han revisado ideas aceptadas sobre la motivación, la resiliencia y el desarrollo de la identidad. Las investigaciones sobre el efecto de enseñar a los niños a apreciar su herencia racial han ampliado los límites del concepto tradicional de desarrollo de la identidad.

La diversidad resulta importante para reducir los sesgos y conocer diferentes modos de observar el mundo. Dos de nosotros (Bang y Medin) y nuestros colaboradores hemos documentado la influencia de la cultura en la forma en que el ser humano percibe la naturaleza: los estadounidenses rurales de origen europeo tienden a verse a sí mismos como separados de la naturaleza, mientras que los nativos se ven a sí mismos como parte de ella. Esta percepción nos predispone a pensar de cierto modo sobre las cuestiones ambientales. Puede explicar también por qué la mayoría de la población no concibe los entornos urbanos como parte de la naturaleza y considera que el ecosistema ideal es el que se halla libre de la influencia humana.

Suele decirse que los científicos deben mantener una distancia profesional con aquello que estudian. Pero tal objetividad resulta engañosa. La ciencia, como un cuadro, se asocia necesariamente a una perspectiva. En la medida en que podamos deshacernos de nuestros sesgos y aprender múltiples puntos de vista, entenderemos mejor nuestro mundo.

Douglas Medin es profesor Louis W. Menk de psicología y profesor de educación y política social.

Carol D. Lee es profesora Edwina S. Tarry de educación y política social y profesora de estudios afroamericanos en la Universidad Noroccidental.

Megan Bang es profesora de psicología de la educación en la Universidad de Washington.

disentía de su postura prepararon peor el debate que aquellos a quienes se les había dicho que era un republicano quien discrepaba. Los republicanos mostraron el mismo patrón. Cuando el desacuerdo proviene de una persona socialmente distinta, nos vemos impulsados a trabajar más. La diversidad nos incita a esfuerzos cognitivos que no realizamos en contextos homogéneos.

Por esta razón, la diversidad parece mejorar la calidad de la investigación científica. Este mismo año, Richard Freeman, profesor de economía de la Universidad Harvard y director del Proyecto Empleados en Ciencias e Ingeniería, de la Agencia Nacional de Investigaciones Económicas de EE.UU., ha llevado a cabo un experimento junto con Wei Huang, doctorando de economía en Harvard. Han examinado la identidad étnica de los autores de un millón y medio de estudios escritos entre 1985 y 2008; para ello se han servido de la Web of Science de Thomson Reuters, una amplia base de datos de publicaciones. Han descubierto que los artículos escritos por grupos heterogéneos son más citados y tienen factores de impacto más altos que los firmados por personas del mismo grupo étnico. Asimismo, han comprobado que los artículos más destacados coinciden con un mayor número de afiliaciones de los autores.

EL PODER DE LA ANTICIPACIÓN

La diversidad no solo ayuda a la hora de aportar ideas distintas. El simple hecho de introducir variedad social en un grupo hace prever a sus miembros que habrá diferencias de perspectiva entre ellos, y esa impresión provoca cambios en la conducta.

Los integrantes de un grupo homogéneo comparten, de alguna manera, la convicción de que estarán todos de acuerdo, de que entenderán los puntos de vista y las opiniones de los demás, y de que podrán llegar fácilmente a un consenso. Pero cuando notan que son socialmente distintos unos de otros, sus expectativas cambian. Suponen que existirán diferentes opiniones y puntos de vista, y que deberán esmerarse más para alcanzar un acuerdo. Esta lógica ayuda a explicar los aspectos positivos y negativos de la diversidad social: si bien los entornos cognitiva y socialmente diversos exigen un mayor esfuerzo, algo que tal vez no guste, tal empeño contribuye a obtener unos mejores resultados.

En 2006, el psicólogo social Samuel Sommers, de la Universidad de Tuft, llevó a cabo una investigación sobre la toma de decisiones en jurados populares. Descubrió que, durante la deliberación sobre un caso de agresión sexual, los jurados con

CIENCIA CIUDADANA, CIENCIA ABIERTA

Steven Bishop

Abrir la ciencia a la participación del público, la denominada ciencia ciudadana, ha fomentado diversos proyectos con los que se han hecho posibles verdaderas innovaciones y cambios de conducta. Ha logrado algo más que incentivar la investigación existente; ha adoptado una serie de puntos de vista que, de otro modo, habrían pasado desapercibidos. Ha permitido que otras personas proporcionen ideas novedosas para resolver problemas nuevos.

La ciencia ciudadana se impulsa, sobre todo, a través de Internet, de la computación en la nube, de los teléfonos inteligentes y de las redes sociales. Permite a miles de científicos, así como a individuos no cualificados de todo el mundo, participar en la recopilación de información y de conocimiento a diversas escalas: Galaxy Zoo (galaxyzoo.org) clasifica galaxias; Qcumber (q-cumber.org) permite a los usuarios denunciar lugares con riesgos ambientales; el proyecto FeederWatch (feederwatch.org) contabiliza aves en Norteamérica; y el California Roadkill Observation System (wildlifecrossing.net/California) informa sobre animales atropellados por vehículos. Estos programas permiten el muestreo de datos a una escala más detallada de lo que se podría conseguir por cualquier otro medio.

Gracias a la ubicuidad de los dispositivos móviles, los proyectos no tienen que estar restringidos al público pudiente, instruido y educado. En su trabajo con los grupos étnicos baka de Camerún, Jerome Lewis, del Colegio Universitario de Londres, usa simples imágenes para documentar los árboles de alto valor. La estrategia se está aplicando también a proyectos de ciencias sociales para estudiar la discriminación y los abusos de los derechos humanos, y para apoyar a las poblaciones autóctonas para que se defiendan mejor frente a los forasteros.

Además de recopilar datos, la ciencia ciudadana cambia nuestras percepciones. El Recuento Navideño Anual de aves de Audubon (birds.audubon.org/christmas-bird-count) provee información sobre los movimientos de poblaciones de aves. El proyecto, que se creó para reemplazar la tradición de los norteamericanos de disparar a los pájaros el día de Navidad, ha promovido un cambio cultural en la sociedad.

Con esta estrategia, las ideas se propagan con rapidez. Un proyecto que empieza en el aula puede convertirse pronto en una iniciativa mundial. Plataformas como Leafsnap (leafsnap.com), cuyo propósito es identificar plantas, revierte la información a los individuos. Este conocimiento colectivo puede desencadenar otras ideas y métodos nuevos de hacer ciencia. Así se ha visto en la resolución de problemas sobre plegamientos de proteínas propuestos por el proyecto Foldit (fold.it/portal). Plataformas como Zoouniverse (zooniverse.org) proporcionan a millones de personas el acceso a todo tipo de colaboraciones. En el CERN y en otros proyectos científicos a gran escala, gentes con distintas capacidades han unido esfuerzos para conseguir objetivos específicos.

Con la participación ciudadana se añade una nueva dimensión a la ciencia, la de permitir que la población proponga soluciones nuevas a problemas irresueltos. En Islandia, después de la quiebra financiera, los ayuntamientos tuvieron que tomar decisiones difíciles sobre el mejor modo de invertir sus escasos ingresos. Se creó Better Reykiavik para que los ciudadanos debatieran sobre ideas innovadoras que mejorasen sus municipios y opinaran sobre ellas (*crowdsourcing*), dieron prioridad a algunas y decidieron qué presupuestos se les asignaba. Estos logros nos abren los ojos a nuevos modos de sufragar la ciencia, como la plataforma de financiación colectiva (*crowdfunding*) Experiment (experiment.com). ¿Cuánto tiempo ha de transcurrir antes de que estos métodos de financiación se impongan?

Cuando se combinen con el tratamiento de grandes cantidades de datos, los proyectos de ciencia ciudadana se extenderán todavía más. Las plataformas abiertas permitirán el acceso a datos, modelos y análisis, para que los individuos puedan formular sus propias preguntas y buscar soluciones. Ello cambiará el modo de enseñar ciencia y de hacer investigación.

Steven Bishop es profesor de matemáticas en el Colegio Universitario de Londres.

LA IMPORTANCIA DE LA EXPERIENCIA PERSONAL

D. N. Lee

Abordar problemas tan dispares como la seguridad ciudadana o el acceso al agua potable requiere ciencia. Con todo, durante la mayor parte de su historia, la ciencia se ha conformado según los valores europeos. Los varones europeos y norteamericanos de raza blanca han controlado, en gran medida, quién formula las preguntas, cómo se analizan y qué es relevante. Se han realizado un sinnúmero de descubrimientos e innovaciones importantes, pero se han ignorado numerosas cuestiones a causa de la limitada experiencia personal de los científicos.

Un investigador que se dedica a un tema que le interesa personalmente crea una ciencia más amplia de miras y más valiosa para todos. Robin Nelson, profesora asociada de antropología de la Universidad de Skidmore, apunta que están cambiando las opiniones sobre el diseño de los estudios de antropología biológica, porque cada vez más se reconoce la importancia de la experiencia personal en el modo en que se configura la ciencia. Recuerda como, en una ocasión, cuando examinaba las estrategias de las mujeres cuidadoras en las familias caribeñas, atendió al consejo de algunas de ellas y amplió su investigación para incluir a miembros varones de la familia, quienes también contribuyen al bienestar familiar.

«Para entender la dinámica de las mujeres como cuidadoras, tuve que aprender cómo construían ellas su universo», explica Nelson. «Viven en un sistema social patriarcal. Necesitaba entrevistar también a los hombres de la familia, como los padres y hermanos.» Descubrió que las estrategias de las mujeres como cuidadoras solían ser, en parte, una respuesta a la aportación económica y emocional de los varones.

Cuando un individuo de un grupo infrarrepresentado se dedica a la ciencia, a menudo lo hace tratando de cumplir una misión. Carl Hart, profesor de psicología y psiquiatría de la Universidad de Columbia, creció en un barrio marginal de Miami durante la guerra de las drogas de los años ochenta. Tras haber sido testigo del sufrimiento de amigos y vecinos víctimas de la delincuencia relacionada con las drogas, y tras haber consumido y vendido él mismo estupefacientes durante un tiempo, se replanteó su trayectoria. Se graduó en la universidad y se dedicó a estudiar los efectos fisiológicos de las drogas en el cerebro, porque deseaba entender cómo afectaba su consumo a las personas. «Se tiene una perspectiva distinta de la que adoptan habitualmente los científicos y, por consiguiente, se abordan los problemas de otro modo», declaró al *Huffington Post* en 2003.

D. N. Lee investiga sobre ecología y comportamiento animal en la Universidad estatal de Oklahoma. Escribe el blog *The Urban Scientist* en *Scientific American*.com

Margaret Hiza Redsteer, investigadora del Servicio de Inspección Geológica de Estados Unidos, analiza los impactos del cambio climático en la tierra y el agua de la nación navajo. Crió a su familia en la reserva, frustrada porque el suministro de agua era intermitente y a veces estaba contaminado. Cuando decidió ir a la universidad, a los 28 años, se decantó por la geología y la hidrología porque quería entender mejor las relaciones entre la tierra, su uso y el agua que necesitaba su comunidad. Según ella, nuestra identidad define en gran parte cómo vemos el mundo y cómo enfocamos un problema. «Usar el conocimiento tradicional de los nativos no es solo importante desde el punto de vista científico, sino también cultural. En ciencia necesitamos personas que enfoquen las cuestiones desde esta perspectiva para que podamos aprender; y, con suerte, enseñar a otros cómo administrar mejor la tierra».

La preocupación de los ecologistas por la perturbación del entorno urbano es reciente. Pero tales problemas no resultan nuevos para la población de raza negra ni para quienes viven en comunidades pobres y que son sensibles a la justicia ambiental. Kellen A. Marshall-Gillespie, doctoranda de ecología urbana de la Universidad de Illinois en Chicago, notó cómo la contaminación de los coches y la industria afectaba a la salud respiratoria de los ciudadanos. Dedujo que las sustancias contaminantes dificultaban el crecimiento y el desarrollo fisiológico de las plantas, entre ellas las verduras de las huertas cercanas. «Las desigualdades ambientales y el racismo tienen implicaciones tremendas en la sostenibilidad de los sistemas naturales y en los servicios ecosistémicos», escribió para la Sociedad Ecológica de EE.UU. «Sentí la profunda responsabilidad de relacionar entre sí las ventajas sociales del estudio de servicios ecosistémicos, la justicia ambiental y la segregación.»

Cuando la ciencia es inclusiva, todo el mundo se beneficia. Por fin se escuchan las comunidades desatendidas durante largo tiempo, y los científicos que lo hacen se ven recompensados con nuevas ideas.

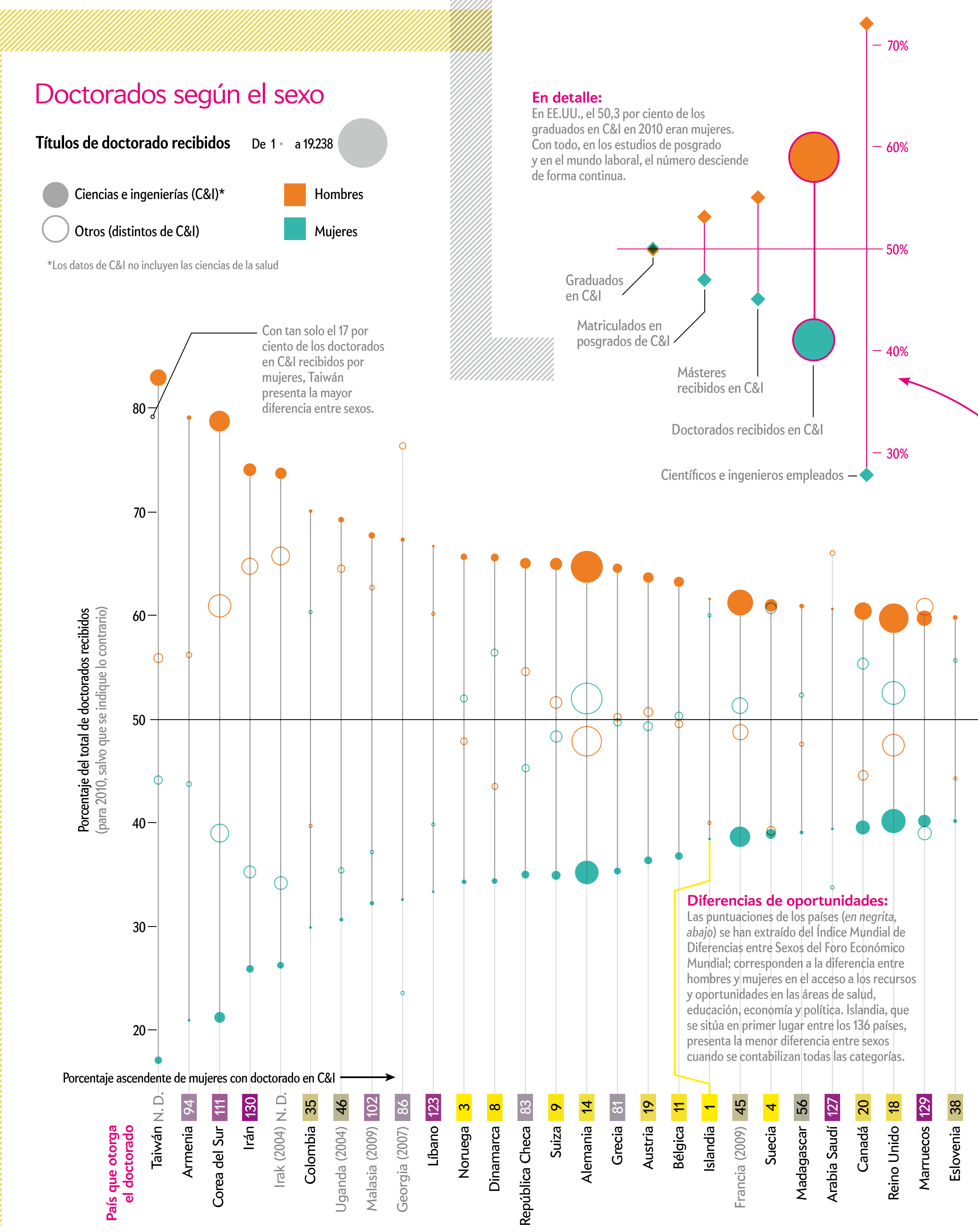
diversidad racial intercambiaban informaciones más variadas que aquellos en los que todos los miembros eran blancos. Sommers, en colaboración con magistrados y secretarios judiciales, organizó juicios ficticios con personas que habían sido miembros de jurados reales. Aunque los participantes sabían que los jurados falsos formaban parte de un experimento auspiciado por el tribunal, no sabían que el verdadero propósito de la investigación era estudiar el impacto de la diversidad racial en la toma de decisiones del jurado.

Sommers creó dos tipos de jurados: unos con seis integrantes blancos y los otros con cuatro miembros blancos y dos negros. Como era de esperar, los jurados mixtos fueron más competentes. Consideraron los hechos de cada caso, cometieron menos errores a la hora de recordar información relevante y demostraron mayor amplitud de miras al discutir el papel de la raza en el caso. Este rendimiento superior no ocurrió necesariamente porque los miembros negros aportaran información novedosa al grupo, sino porque los miembros blancos modificaron su conducta en presencia de los negros. La diversidad les indujo a mostrarse más diligentes e imparciales.

EJERCICIO DE GRUPO

Considere el lector que está escribiendo una parte de un ensayo para presentarlo en una conferencia. El coautor del ensayo es chino y usted español, por lo que prevé algún desacuerdo o dificultad de comunicación entre ambos. Debido a esta diferencia social, tal vez se centre en otras desemejanzas, como la cultura, la educación y las experiencias vitales, unas diferencias que no esperaría de un colaborador español. ¿Cómo se prepara para la conferencia? Con toda probabilidad, deberá trabajar más para explicar sus razonamientos y contar con alternativas, algo a lo que no se vería obligado si su colega fuera español.

Así es como funciona la diversidad: promueve el esfuerzo y la creatividad; incita a plantearse alternativas incluso antes de que tenga lugar cualquier interacción personal. El esfuerzo extra que supone la diversidad puede compararse con el de hacer ejercicio físico: cuesta fortalecer los músculos, pero, como dice el antiguo dicho, quien algo quiere algo le cuesta. Del mismo modo, si pretendemos cambiar, crecer e innovar, necesitamos diversidad en los equipos de trabajo, en las organizaciones y en la sociedad en general.



Doctorados según el sexo
Títulos de doctorado recibidos
De 1 a 19.238
Ciencias e ingenierías (C&I)*
Otros (distintos de C&I)
Hombres
Mujeres
*Los datos de C&I no incluyen las ciencias de la salud
En detalle:
En EE.UU., el 50,3 por ciento de los graduados en C&I en 2010 eran mujeres. Con todo, en los estudios de posgrado y en el mundo laboral, el número desciende de forma continua.
70%
60%
50%
40%
30%
Graduados en C&I
Matriculados en posgrados de C&I
Másteres recibidos en C&I
Doctorados recibidos en C&I
Científicos e ingenieros empleados
Con tan solo el 17 por ciento de los doctorados en C&I recibidos por mujeres, Taiwán presenta la mayor diferencia entre sexos.
80
70
60
50
40
30
20
Porcentaje del total de doctorados recibidos
(para 2010, salvo que se indique lo contrario)
Porcentaje ascendente de mujeres con doctorado en C&I
Diferencias de oportunidades:
Las puntuaciones de los países (en negrita, abajo) se han extraído del Índice Mundial de Diferencias entre Sexos del Foro Económico Mundial; corresponden a la diferencia entre hombres y mujeres en el acceso a los recursos y oportunidades en las áreas de salud, educación, economía y política. Islandia, que se sitúa en primer lugar entre los 136 países, presenta la menor diferencia entre sexos cuando se contabilizan todas las categorías.
País que otorga el doctorado
Taiwán N. D.
Armenia 94
Corea del Sur 111
Irán 130
Irak (2004) N. D.
Colombia 35
Uganda (2004) 46
Malasia (2009) 102
Georgia (2007) 86
Líbano 123
Noruega 3
Dinamarca 8
República Checa 83
Suiza 9
Alemania 14
Grecia 81
Austria 19
Bélgica 11
Islandia 1
Francia (2009) 45
Suecia 4
Madagascar 56
Arabia Saudí 127
Canadá 20
Reino Unido 18
Marruecos 129
Eslovenia 38
N. D. = Datos no disponibles

DIFERENCIAS POR RAZÓN DE SEXO

Mujeres y hombres con estudios de doctorado en el mundo

LAS MUJERES que asisten a la universidad y estudian ciencias o ingenierías son cada vez más numerosas, si bien tanto en Estados Unidos como en el resto del mundo las empleadas en estos campos constituyen una minoría. Es difícil obtener cifras comparativas, pero el número de doctorados otorgados a hombres y mujeres es dispar. La gráfica de abajo, elaborada a partir de los datos recopilados por la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU., analiza la proporción de sexos entre las personas con estudios de doctorado de 56 países. La situación varía mucho de un país a otro, pero hay interesantes excepciones a la tendencia mundial, como evidencian las cifras.

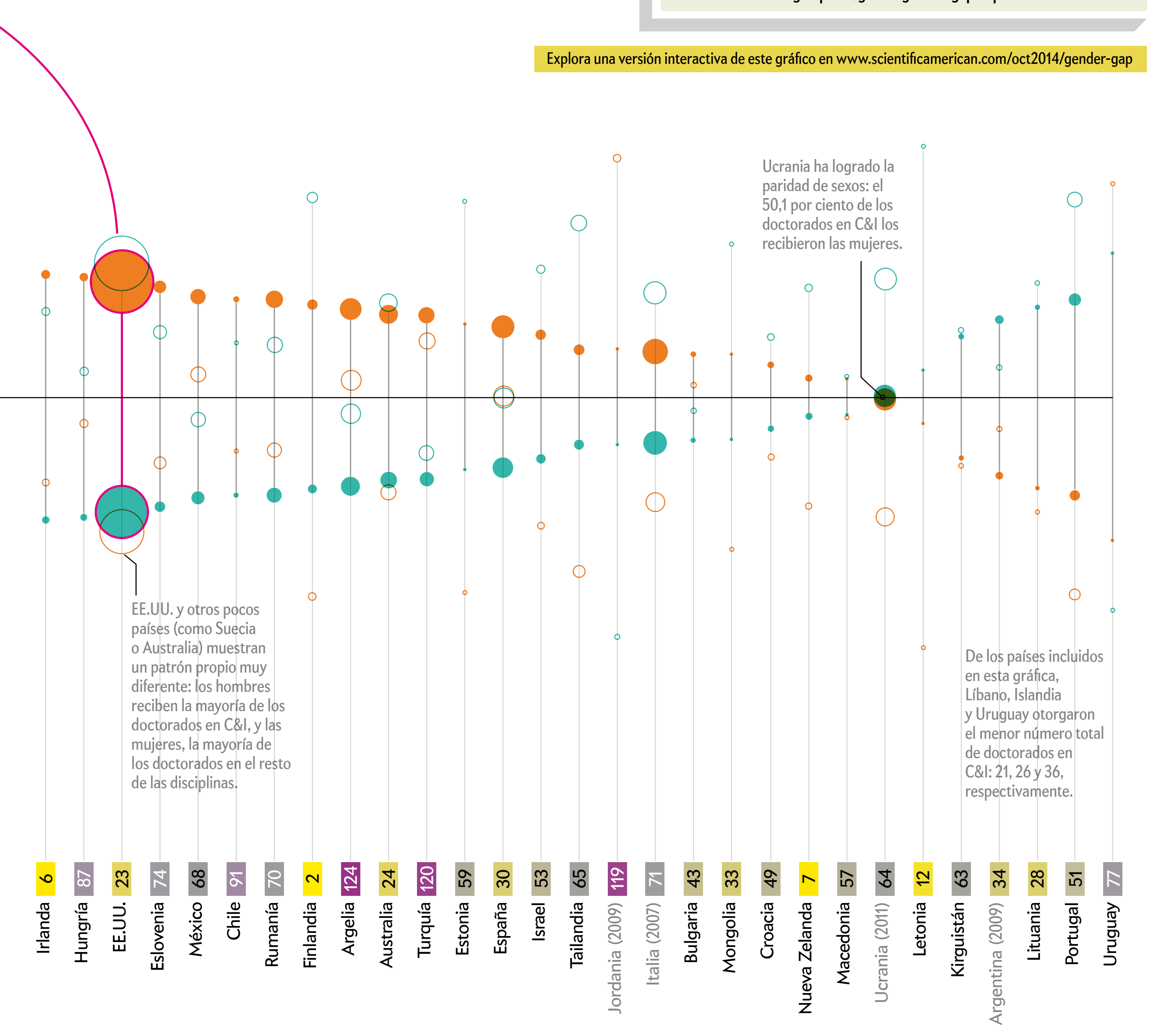
PARA SABER MÁS

Libro blanco. Situación de las mujeres en la ciencia española. VV. AA. Ministerio de ciencia e innovación, 2010.

Science and engineering indicators 2014. Consejo Nacional de Ciencia. Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU., 2014. **www.nsf.gov/statistics/seind14/index.cfm/home**

The global gender gap report 2013. Foro Económico Mundial, 2013. **www.weforum.org/reports/global-gender-gap-report-2013**

Explora una versión interactiva de este gráfico en www.scientificamerican.com/oct2014/gender-gap



FUENTES: *SCIENCE AND ENGINEERING INDICATORS 2014*, POR EL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA. FUNDACIÓN NACIONAL PARA LA CIENCIA DE EE.UU., 2014 (*datos de educación*); *THE GLOBAL GENDER GAP REPORT 2013*. FORO ECONÓMICO MUNDIAL. 2013 (*Índice Mundial de Diferencias entre Sexos*) PERISCOPIC Y JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*), AMANDA HOBBS (*investigación*)



Victoria Plaut es psicóloga social y profesora de derecho y ciencias sociales en la Universidad de California en Berkeley.

TODO EL MUNDO ES BIENVENIDO

No existe una receta universal para llevar la diversidad al aula o al lugar de trabajo. Con todo, las últimas investigaciones sobre el funcionamiento de la diversidad sugieren algunas estrategias prometedoras

Victoria Plaut

CADA VEZ QUE IMPARTO UNA CONFERENCIA sobre diversidad escucho la misma pregunta: ¿cómo lo hacemos? Todas mis audiencias (escuelas, departamentos académicos, empresas, organizaciones sanitarias o despachos de abogados) parecen desorientadas. Esperan una receta secreta o una lista de verificación infalible. Querrían oírme decir: «Siga estos sencillos pasos y obtendrá diversidad e inclusión». Así pues, permítanme comenzar con un aviso: no existe ningún método sencillo e infalible que garantice que en un grupo habrá una proporción representativa de personas de diferentes razas, etnias, niveles socioeconómicos o sexos.

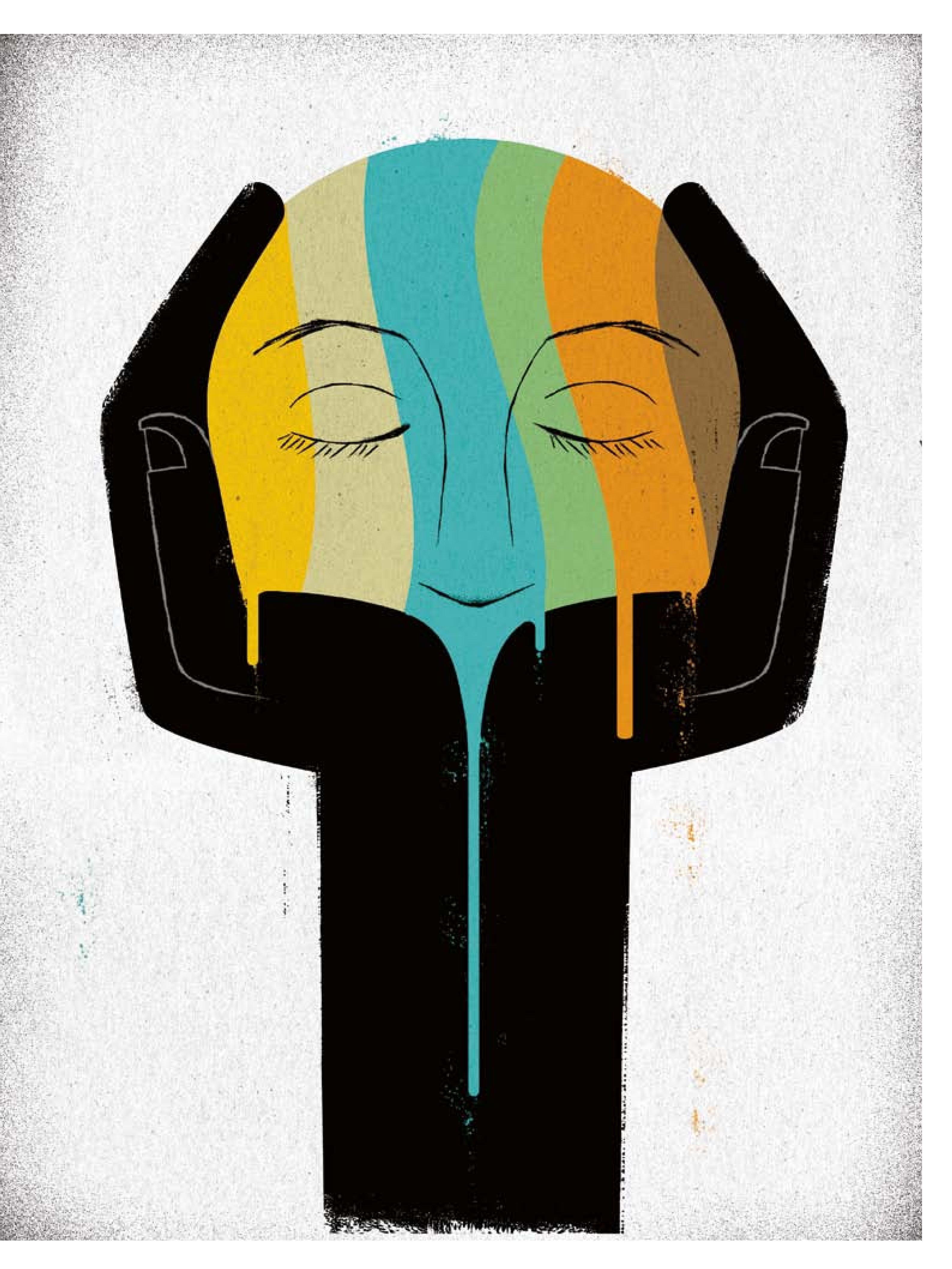
EN SÍNTESIS

Por sí solas, las buenas intenciones no garantizan la diversidad en el entorno laboral o académico. Un corpus creciente de investigaciones en ciencias sociales está comenzando a revelar qué estrategias presentan mayores probabilidades de éxito.

Varias concepciones erróneas suelen dificultar la creación del ambiente laboral o académico idóneo para que los miembros de grupos minoritarios se involucren de forma productiva y mantengan su compromiso con la empresa.

Fomentar la diversidad en ciencia, tecnología y atención sanitaria requiere, como mínimo, prestar atención a las diferencias, alimentar un sentido de pertenencia al grupo y encomendar a personas concretas la responsabilidad de cumplir esos objetivos.

ILUSTRACIONES DE EDEL RODRIGUEZ



Existen tres nociones erróneas pero muy extendidas que, según mi experiencia, frustran el deseo sincero de numerosas personas y organizaciones de crear un ambiente más inclusivo en el aula o el lugar de trabajo. En primer lugar, a menudo pensamos que para promover la diversidad no es necesario reflexionar sobre qué nos hace diferentes. Segundo, solemos dar por sentado que todos experimentamos el entorno escolar o laboral de la misma manera. Y tercero, cuando surgen problemas asumimos que personalmente no podremos hacer gran cosa para solucionarlos, ya que, o son demasiado sistémicos, o han sido provocados por un puñado de personas con prejuicios (que podrían cambiar con la instrucción adecuada).

La investigación al respecto ha demostrado que, por generalizadas que estén, tales suposiciones son erróneas. Su persistencia alimenta la impresión equivocada de que todo lo que se necesita para embarcarse en una carrera de ciencia, tecnología, ingeniería o matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés) es ser competente, estar motivado y tener acceso a las herramientas adecuadas. Y, a su vez, tales falacias alimentan conclusiones falsas: si alguien no opta por una carrera de ciencias es porque no puede o no quiere.

Por fortuna, todo aquel dispuesto a intentarlo podrá superar tales prejuicios. Cada vez más estudios en psicología social experimental y en sociología de las organizaciones sugieren que, para crear un entorno más inclusivo, algunas estrategias funcionan mejor que otras. Las últimas investigaciones al respecto y una nueva manera de entender el fenómeno ya están ayudando a generar entornos más inclusivos en varias organizaciones.

RECONOCER LA DIFERENCIA

Tal vez exista un mundo ideal en el que la raza o el sexo carezcan de importancia en el contexto laboral o escolar. En la práctica, sin embargo, a la mayoría de la gente le resulta más fácil progresar en un entorno que se esfuerza activamente por apoyarles y en el que pueden sentirse seguros siendo diferentes.

Hace varios años, junto con otros colaboradores, llevamos a cabo un estudio en una organización sanitaria en la que trabajaban científicos, médicos, enfermeros y otros profesionales de la

LA (IN)VISIBILIDAD DE LAS MUJERES

Brian Welle y Megan Smith

Gloria Steinem, una de las figuras históricas del feminismo estadounidense, dijo una vez: «Las mujeres hemos sido la mitad del pasado, pero no la mitad de la historia». Estas palabras vienen al caso porque, hace unos años, descubrimos un aspecto enojoso de nuestro querido Google Doodle (la cabecera gráfica cambiante del motor de búsqueda). Desde la fundación de la compañía, en 1998, nuestra tarea ha sido decorar el logo de la página de inicio para conmemorar el aniversario de personas relevantes. Durante los siete primeros años, no elegimos ninguna mujer. Entre 2010 y 2013 la cifra mejoró algo: la representación femenina llegó al 18 por ciento; la de mujeres de raza no blanca, a un demoledor 4 por ciento. El 62 por ciento de los evocados fueron hombres blancos. Nunca habíamos reparado en esa desproporción.

Sin embargo, Internet sí lo hizo. Los defensores de la igualdad de sexos nos llamaron la atención públicamente: un espejo en el que pudimos ver el sesgo inconsciente que habíamos heredado. El problema va mucho más allá de Google. La visibilidad de las mujeres y de las minorías en los trabajos científicos y tecnológicos —y, en general, en nuestra cultura— deja mucho que desear.

En EE.UU., las mujeres conforman la mitad de la fuerza laboral y ocupan alrededor del 30 por ciento de los puestos en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). Sin embargo, menos del 21 por ciento de los personajes femeninos del cine, los programas televisivos de máxima audiencia y las emisiones infantiles adoptan dicho papel. El porcentaje de mujeres informáticas en el cine es aún más bajo: una por cada 15 hombres. (Estas cifras proceden del Instituto Geena Davis sobre Género en los Medios de Comunicación, que ha realizado un gran trabajo de catalogación de las niñas y mujeres que aparecen en los medios familiares e infantiles; en 2003, el centro recibió por ello el premio Global Impact de Google).

La visibilidad importa. Una gran cantidad de estudios ha demostrado que, cuando vemos que en una profesión la representación de personas parecidas a nosotros es muy baja, nos sentimos menos bienvenidos y más incómodos. Ello puede acabar afectando al rendimiento y, en última instancia, provocar que un menor número de mujeres o de individuos de grupos minoritarios se decidan por iniciar una carrera en informática o permanezcan en ella una vez comenzada.

Lo ocurrido con Google Doodle se convirtió en una oportunidad para aprender. Hace poco, la compañía encargó un proyecto con el objetivo de identificar qué factores animan a las chicas jóvenes a estudiar programación. Los resultados corroboraron lo que ya sabíamos. El estímulo de padres o profesores resulta esencial para que aprecien sus propias facultades. Necesitan entender el trabajo y ver su proyección e importancia. Deben tener la posibilidad de practicar para tener un contacto con la disciplina. Y, lo más importante, han de entender que la industria tecnológica les brinda numerosas oportunidades.

El campo de la informática está creciendo con rapidez y necesita urgentemente revisar su reputación y los estereotipos que se le asocian. A tal fin, Google lanzó en junio Made with Code, un proyecto de 50 millones de dólares que, durante tres años, financiará iniciativas destinadas a fomentar que las chicas estudien programación, como Girls Scouts, Girls Inc. y Girls Who Code. En 2012 creamos Women Techmakers, una organización para el desarrollo profesional que, en parte, pretende aumentar la visibilidad de aquellas mujeres y miembros de grupos minoritarios que ya trabajan en el campo de la tecnología, en ocasiones liderando equipos enteros. Algunos se encuentran entre los fundadores más importantes e influyentes de nuestra industria, lo que reafirma la idea de que la invisibilidad constituye un verdadero problema.

El proceso que mantiene a mujeres y miembros de grupos minoritarios alejados de trabajos técnicos puede empezar mucho antes de que los programas educativos tengan una oportunidad de surtir efecto. Comienza con algunos prejuicios que los niños adquieren a edades muy tempranas y que luego se van consolidando, a menudo sin que amigos, padres o medios de comunicación se percaten de ello. Dichos prejuicios pueden llegar a afectar a la conducta y las decisiones incluso de las personas mejor intencionadas. Pueden influir en la trayectoria educativa elegida por niños

salud. Les preguntamos si, para promover la diversidad, pensaban que la organización debía ignorar deliberadamente las diferencias raciales y étnicas o si, por el contrario, era mejor asumirlas de forma positiva. Después, analizamos cómo se sentían los empleados no blancos con respecto a su trabajo y a la organización. Hallamos que, en aquellos departamentos donde los trabajadores blancos creían que las diferencias debían ignorarse, la sensación de pertenencia de los empleados de otras razas era menor, con independencia de cuántos de ellos hubiese en el departamento. Además, allí donde las diferencias preferían ignorarse, los miembros de los grupos minoritarios percibían más prejuicios. En los departamentos dispuestos a reconocerlas, ocurría lo contrario.

Varios estudios han indicado una relación entre esa disposición a reconocer la diversidad y la existencia de prejuicios inconscientes. En 2004, Jennifer A. Richeson, a la sazón en la Universidad Dartmouth, y sus colaboradores practicaron varias pruebas psicológicas a unos cincuenta estudiantes blancos. A la mitad de ellos se les entregó documentación que argumentaba a favor de ignorar la diversidad en aras de alcanzar una mayor armonía interracial; la otra mitad recibió material que abogaba por reconocer las diferencias raciales de forma deliberada. Después, Richeson midió la velocidad de reacción de los participantes cuando se les pedía emparejar palabras con connotaciones étnicas (por ejemplo, «Jamal-bueno» y «Josh-bueno», o «Jamal-malo» y «Josh-malo»). Un sujeto libre de prejuicios debería unir cualquier par de palabras con igual rapidez. Por el contrario, una mayor velocidad a la hora de asociar blanco con agradable o negro con desagradable indicaría un sesgo implícito a favor de los blancos.

Si bien ambos grupos finalizaron las pruebas más rápido cuando tenían que emparejar blanco y agradable, quienes habían leído el material que defendía el enfoque multicultural mostraron una diferencia de tiempos menor. Richeson, hoy en la Universidad Noroccidental, concluyó que las políticas que promueven ignorar la diversidad podrían resultar contraproducentes, ya que parecen avivar —o al menos no mitigar— sesgos inconscientes. Otros estudios más recientes han revelado que los enfoques basados en ignorar las diferencias raciales tienden a incrementar las conductas prejuiciosas, tanto verbales como no verbales, en los estudiantes blancos; y, tal vez por la misma razón, a agotar cognitivamente a los estudiantes de otras razas.

Varias investigaciones han demostrado que nuestros prejuicios acaban aflorando de forma sutil. Un estudio realizado en 2002 evaluó las actitudes raciales explícitas e implícitas de un grupo de estudiantes blancos a partir de un cuestionario y de los tiempos de respuesta en cierta tarea. Después, cada uno de ellos mantuvo una conversación con un estudiante negro sobre un tema no ligado directamente a la raza (citas amorosas). Por último, se pidió a otros estudiantes que escuchasen una cinta de audio con la voz de los participantes y juzgasen su amabilidad verbal. También se les enseñaron vídeos mudos en los que solo aparecía el estudiante blanco, a fin de que evaluasen la afabilidad de sus gestos. Los sujetos cuyo tono de voz se percibía como menos amable fueron también los que puntuaron más bajo en el cuestionario sobre prejuicios explícitos. Por su parte, aquellos cuyos gestos fueron calificados como más rudos puntuaron peor en el test que medía los tiempos de respuesta. Así pues, incluso los prejuicios supuestamente ocultos parecen poder detectarse con facilidad.

Tales reacciones no pasan inadvertidas para los miembros de grupos sociales minoritarios, que pueden llegar a desalentarse y acabar por abandonar un área de estudio o una empresa. Las encuestas en campus universitarios sugieren que, para dichos estudiantes, el clima de diversidad que perciban o la vivencia de prejuicios y experien-

y niñas, así como en la cultura imperante en su futuro lugar de trabajo.

Con el ánimo de combatir tales prejuicios, en mayo de 2013 Google creó el equipo Unconscious Bias («sesgo inconsciente»). Sus objetivos incluyen enseñar a los empleados a reconocer conductas prejuiciosas —propias o ajenas—, proporcionarles las herramientas necesarias para modificar su comportamiento y, a la postre, cambiar la cultura de la empresa para hacerla más inclusiva y receptiva a la diversidad. En los últimos dos años, más de 20.000 empleados de Google hemos participado en un programa de formación para aprender a identificar y erradicar comportamientos tendenciosos tanto en el trabajo como en nuestra vida familiar.

Las investigaciones sugieren que el simple hecho de comunicar que la tecnología se está abriendo a mujeres y minorías debería ejercer efectos positivos. Hace poco, Emily Shaffer, de la Universidad Tulane, y sus colaboradores descubrieron que leer un artículo sobre la mayor representación en las mujeres en las áreas de STEM bastaba para que las chicas puntuasen mejor en las pruebas de matemáticas y otras tareas, eliminando cualquier diferencia de rendimiento con los chicos.

Armados con esta información y con el reconocimiento de que las cosas deben cambiar, hemos comenzado a colaborar con profesionales del mundo de la comunicación: personas influyentes en Hollywood, como escritores, directores, productores, actores, representantes o directores, que, tal vez, puedan contribuir a cambiar lo que percibimos a través de las pantallas. Hace poco invitamos a los guionistas de la popular serie televisiva *Silicon Valley* a hablar sobre innovación con algunas mujeres brillantes de nuestro campo; una fuente de inspiración —esperamos— para crear nuevos personajes.

Gloria Steinem también dijo: «No penséis en cómo hacer que las mujeres se adapten al mundo, sino en cómo adaptar el mundo a las mujeres». Nuestra industria solo está empezando a apreciar qué significa cambiar la cultura de trabajo y dar cabida a las mentes innovadoras que hasta ahora habíamos ignorado. Es importante no solo para incluir a los mejores talentos, sino también para fabricar mejores productos.

En Doodle llevamos más de un año intentando corregir el desequilibrio de sexos y minorías en nuestra lista de personajes célebres. Este verano, las mujeres representaban el 49 por ciento de las 51 cabeceras gráficas publicadas en 2014. Las personalidades de raza no blanca llegaron a un 33 por ciento. Estamos en el buen camino, pero aún nos queda margen para mejorar.

La industria tecnológica ha abierto los ojos a la realidad de sus prejuicios inconscientes. Creemos que nuestra cultura de innovación nos brinda el potencial para liderar el cambio. Depende de nosotros ver la realidad y contribuir a mejorarla. Ser más conscientes nos ayudará a descubrir, depurar, innovar, pilotar y proyectar soluciones para nuestros déficits culturales.



Brian Welle es director de analítica de personas en Google.

Megan Smith es empresaria y vicepresidenta de Google[x].

cias discriminatorias pueden influir en su decisión de evitar o abandonar carreras en las áreas de STEM. Lo mismo ocurre en el mundo laboral: la percepción de los trabajadores sobre cuánto acepta una empresa la diversidad permite predecir cuán proclives serán los miembros de una minoría a abandonarla. Como consecuencia, una política basada en ignorar las diferencias dificultará que una organización vea qué procesos incitan a sus miembros a involucrarse de manera productiva o, por el contrario, a cambiar de aires.

Abandonar una política basada en pasar por alto las diferencias no libera necesariamente del problema. Sin embargo, aceptar la diversidad de un modo que no implique estereotipos ni encasillamientos sí parece prometedor. En un experimento de intervención realizado recientemente por Nicole M. Stephens y sus colaboradores en la Universidad Noroccidental, un grupo de alumnos de primer curso (el grupo experimental) asistió a una mesa redonda en la que otros estudiantes analizaban sus experiencias poniendo énfasis en la diversidad; el tema en cuestión versaba sobre su condición de primera generación de universitarios en su familia. Otro grupo (el grupo de control) presenció un debate similar, pero en el que las cuestiones relativas a las diferencias no se trataron. En ambas charlas se dieron consejos, pero en la primera los participantes relacionaron de forma explícita su clase social con los obstáculos que se habían encontrado y las estrategias que habían adoptado. Más importante aún, en dicho grupo las diferencias se trataron desde un punto de vista constructivo y alentador, no como un impedimento. Como resultado de dicha intervención de una hora, al final del primer semestre la brecha académica que separaba a los estudiantes cuyos padres habían ido a la universidad de aquellos cuyos progenitores no lo habían hecho se redujo en un 63 por ciento.



REFORZAR LA PERTENENCIA

Es fácil pensar que la ciencia es ciencia y que para dedicarse a ella basta con tener la preparación y la motivación necesarias. Sin embargo, la realidad resulta más compleja. Varias investigaciones en psicología social sugieren que, para los estudiantes de grupos minoritarios, el sentimiento de pertenencia influye de manera clave en la participación y el rendimiento.

Gregory M. Walton y Geoffrey L. Cohen, de Stanford, pusieron a prueba esta hipótesis con un experimento en el que participaron casi cien alumnos de primer curso de una universidad de élite (no identificada en su informe de 2011). La mitad ellos (el grupo experimental) leyó testimonios de estudiantes más veteranos que reconocían haber sufrido dificultades sociales durante el primer año; aunque al principio eso les hizo replantearse su pertenencia a la universidad, al final su confianza al respecto se repuso. La otra mitad (el grupo de control) recibió información independiente sobre los cambios en las actitudes sociales y políticas. Tres años después de la intervención, los investigadores midieron el progreso académico de los alumnos. Para los estudiantes blancos, haber formado parte de uno u otro grupo no supuso gran diferencia. Sin embargo, los estudiantes negros del grupo experimental rindieron mucho mejor que los del grupo de control, hasta el punto de que la brecha entre grupos raciales observada al principio del experimento acabó reduciéndose a la mitad. Por supuesto, tal y como señalan Walton y Cohen, una intervención similar bien podría no funcionar en un entorno abiertamente hostil.

La gran importancia que reviste el sentimiento de pertenencia podría explicar por qué las universidades negras de EE.UU. (aquellas fundadas antes de 1964 para proporcionar educación a los estudiantes de esa raza) han generado una cantidad mucho mayor de graduados negros en las áreas de STEM. Las instituciones educativas —o los lugares de trabajo— con mayoría de blancos afrontan dificultades considerables a la hora de crear entornos inclusivos y receptivos. No obstante, existen varios métodos para lograrlo.

En el campo de la informática, por ejemplo, han surgido en todo EE.UU. varias organizaciones sin ánimo de lucro dedicadas a enseñar programación a jóvenes procedentes de grupos minoritarios; entre ellas, Code2040, The Hidden Genius Project, Black Girls Code, CodeNow y Girls Who Code. Estas iniciativas no solo imparten una formación valiosa y promueven oportunidades educativas y profesionales, sino que también refuerzan el sentimiento de pertenencia, favorecen la colaboración y fomentan las aplicaciones relacionadas con la vida de los alumnos y sus comunidades.

Los esfuerzos para fomentar el sentimiento de pertenencia pueden llegar a la decoración de las aulas. En 2009, junto con mis colaboradores, descubrimos que cambiar algunos de los objetos que típicamente pueblan las salas de informática (como carteles de *Star Trek*, paquetes de comida rápida y latas de refrescos) por otros más neutros (fotografías de la naturaleza, tazas de café y botellas de agua) bastaba para aumentar el interés de las alumnas hasta equipararlo con el de los estudiantes varones. Otro estudio reveló que enfatizar que la ciencia constituye más un esfuerzo colectivo que una labor solitaria aumentaba la predisposición de las chicas a escoger una carrera científica.

TOMAR MEDIDAS

Entonces, ¿ya está? ¿Reconocer las diferencias entre personas y hacer que se sientan incluidas basta para conseguir que se

dediquen a la ciencia? Las investigaciones en sociología de las organizaciones sugieren un tercer componente vital: la manera en que una organización estructura los esfuerzos para fomentar la diversidad.

Frank Dobbin, de Harvard, Alexandra Kalev, ahora en la Universidad de Tel Aviv, y sus colaboradores han analizado las iniciativas para fomentar la diversidad que han adoptado cientos de empresas estadounidenses durante tres décadas. Hallaron que las organizaciones que nombran a un responsable específico para promover la diversidad registran una mayor proporción de directivos procedentes de grupos minoritarios. En concreto, emplear a un profesional de diversidad a tiempo completo se traduce, al cabo de cinco o siete años, en un 15 por ciento más de hombres y mujeres negros en puestos directivos. Del mismo modo, en las empresas que designan un grupo de trabajo al respecto formado por varios empleados, se observa un aumento significativo de hombres y mujeres negros, latinos y asiáticos, así como de mujeres blancas, en puestos de responsabilidad.

RECONOCER LAS DIFERENCIAS SIN ESTEREOTIPOS NI ENCASILLAMIENTOS CONSTITUYE UN MÉTODO PROMETEDOR PARA ALCANZAR LA DIVERSIDAD

Otros estudios han revelado que contratar gestores o crear departamentos de fomento de la diversidad aumenta también la efectividad de otras iniciativas, como las redes de apoyo para que las personas de grupos minoritarios se sientan menos aisladas, o los comités que abordan cuestiones concretas, como retener y ayudar a progresar a los trabajadores de dichos grupos. Por otro lado, múltiples estudios, incluidos los de Dobbin y Kalev, han demostrado que los programas de contratación dirigida también contribuyen a aumentar la diversidad de una plantilla.

Sin embargo, que nadie piense que solo las iniciativas sistémicas marcan la diferencia, una creencia muy extendida y relacionada con la última de las cuestiones ignoradas que pretendo abordar. Dobbin, Kalev y otros investigadores han demostrado que, a la hora de elevar la proporción de latinos, asiáticos y mujeres blancas y negras en cargos de dirección, los programas de tutoría parecen ser los más efectivos. En algunos casos, esos aumentos han llegado a ser del 40 por ciento.

También en la enseñanza de las ciencias resulta fundamental disponer de un buen tutor. Las oportunidades para comenzar a colaborar en un laboratorio o para divisar salidas profesionales suelen depender de los tutores, quienes también pueden ayudar a reforzar el proceso de integración descrito más arriba. El psicólogo social y rector de la Universidad de California en Berkeley, Claude Steele, de raza negra, explica en su libro *Whistling Vivaldi* su experiencia como estudiante de doctorado en la Universidad de Ohio. Su director de tesis, blanco, le hizo sentirse siempre parte de un entorno que, de lo contrario, le hubiera resultado ajeno: «Me trataba como un compañero digno. De algún modo, la manera en que concebía su trabajo científico era tal que me incluía a mí como colaborador capaz, al menos en potencia. Mi raza y clase nunca supusieron ningún obstáculo».

Otras investigaciones indican que el liderazgo en diversidad, la contratación selectiva y los programas de tutorías parecen surtir mejor efecto que otras iniciativas más tradicionales, como la formación en diversidad o las evaluaciones de rendimiento de la diversidad. Dobbin, Kalev y sus colaboradores sugieren una razón para ello: las técnicas poco comunes animarían a los gestores a identificar problemas y buscar soluciones, más que hacerles sentir culpables de lo que no funciona.

Por sí solos, tales programas no traerán ningún cambio radical. Pero, si no se limitan a iniciativas meramente simbólicas, sí mejorarán las posibilidades de incrementar la diversidad. Se debe dar a los empleados la responsabilidad y la autoridad institucional para «conseguir» diversidad. Un buen ejemplo de intervención integral lo hallamos en el Programa de Expertos Meyerhoff, de la Universidad de Maryland, que contrata y forma a estudiantes infrarrepresentados en las áreas de STEM. Con catorce medidas diferentes, ha resultado particularmente exitoso a la hora de aumentar el número de titulados de raza negra. Otro ejemplo es la recién formada Alianza Californiana para Estudios Universitarios y el Profesorado (una asociación entre las Universidades de California en Berkeley, Los Ángeles, Stanford y el Instituto de Tecnología de California), dedicada a combatir la infrarrepresentación de grupos minoritarios en el mundo académico. Fundada en los principios que guían la investigación en ciencias sociales, sus objetivos incluyen analizar la efectividad de las diferentes iniciativas —algo importante por cuanto este tipo de información «del mundo real» escasea: no existe ningún repositorio de artículos técnicos ni un sistema que permita la colaboración entre equipos; en especial, entre la empresa y el mundo académico.

Para que tanto las organizaciones científicas como las no científicas obtengan resultados, es necesario comprender mejor cómo opera la diversidad. No importa cuán sincero sea el objetivo: tan solo preocuparse por ella no bastará. Y aunque no hay ninguna receta sencilla para traducir tales sentimientos en acciones y resultados, las organizaciones suelen atraer y retener el talento que aporta la diversidad cuando obran con inteligencia, constancia, alimentan el sentido de pertenencia y contratan a personal especializado para fomentar —y vigilar— la diversidad.

PARA SABER MÁS

Diversity management in corporate America. Frank Dobbin, Alexandra Kalev y Erin Kelly en *Contexts*, vol. 6, n.º 4, págs. 21-27, noviembre de 2007.

Does female representation in top management improve firm performance? A panel data investigation. Cristian L. Dezsö y David Gaddis Ross en *Strategic Management Journal*, vol. 33, n.º 9, págs. 1072-1089, septiembre de 2012.

Clash! 8 Cultural conflicts that make us who we are. Hazel Rose Markus y Alana Conner. Hudson Street Press, 2013.

Diversity science and institutional design. Victoria Plaut en *Policy Insights from the Behavioral and Brain sciences*, vol. 1, n.º 1, págs. 72-80, octubre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Estereotipos del éxito. S. Alexander Haslam et al. en *MyC* n.º 39, 2009.



BIOLOGÍA CELULAR

FUERZAS MECÁNICAS EN LAS CÉLULAS

Las contracciones y distensiones a las que se halla sometida una célula pueden determinar si esta formará parte de un hueso, del cerebro o de un tumor. No todo está en los genes

Stefano Piccolo

JOHN UELAND



Stefano Piccolo es catedrático de biología molecular en la Universidad de Padua. Su laboratorio estudia el modo en que las células detectan cambios en su entorno y usan esta información para formar los tejidos.



LAS CÉLULAS HUMANAS

que examinábamos en el laboratorio mostraban una apariencia amable. Eran normales, sin propiedades cancerosas que les permitieran crecer desmedidamente, invadir tejidos cercanos y en, última instancia, causar la muerte.

Sin embargo, algo anómalo sucedió cuando, al estirar las células desde los extremos, las forzamos a cambiar de forma. Vimos que tal maniobra aumentaba la actividad de dos proteínas, YAP y TAZ, y, como consecuencia, las células se convertían en cancerosas y se replicaban sin control. Fue increíble descubrir que estas alteraciones no se debían a modificaciones genéticas, sino a fuerzas mecánicas.

La biología tiende a explicar la vida a base de genes y proteínas: el gen A produce una proteína que controla al gen B, el cual, a su vez, produce la proteína X, y así sucesivamente. Estas moléculas determinan el comportamiento celular. No obstante, cada vez parece más claro que la función de los genes se complementa con la acción de fuerzas mecánicas generadas por células vecinas o fluidos fisiológicos.

Durante las últimas décadas, los investigadores que estudian el modo en que las células interpretan las fuerzas mecánicas (disciplina conocida como mecanobiología) han descrito la importancia de esos procesos. De este modo, si las células disponen de espacio a su alrededor seguirán dividiéndose, pero si se hallan muy agrupadas tenderán a crecer más despacio. La rigidez del tejido celular constituye otro factor decisivo: cierta clase de células madre, que tienen el potencial de convertirse en cualquier tipo celular, se diferenciarán en neuronas o miocitos dependiendo de si se sitúan en un entorno que imita la rigidez del tejido cerebral o muscular, respectivamente. Esta mecánica es la que guía el ensamblaje de las células madre en una placa de laboratorio para formar órganos complejos, como partes del ojo o estructuras cerebrales.

Hasta hace poco no se entendía cómo las células traducían esas presiones físicas para ordenar un cambio de función. Pero en nuestro laboratorio creemos haber dado con la clave. Hemos descubierto que las proteínas YAP y TAZ actúan como un interruptor que conecta las fuerzas mecánicas externas con el núcleo, donde generan cambios genéticos que determinan el destino de la célula. Cuando ejercemos presiones o inducimos estiramientos en la célula, YAP y TAZ responden a tales fuerzas mediante la activación de ciertos genes. Nuestros datos, junto con los de

EN SÍNTESIS

El cuerpo humano se ve afectado por fuerzas físicas que, a escala microscópica, actúan sobre todas las células. Tales fuerzas, originadas en el entorno celular, pueden causar un impacto tan profundo como los propios genes.

Si las células disponen de suficiente espacio a su alrededor, continúan dividiéndose, pero si se hallan agrupadas tienden a detener o ralentizar su crecimiento. Este comportamiento dependiente del entorno puede determinar la capacidad regenerativa de las células madre.

La conexión entre el mundo físico y el biológico está mediada por ciertas proteínas que actúan a modo de interruptor, las cuales deciden si la célula tendrá un destino normal o se convertirá en un tumor mortal.





AUTOCONTROL: **Las células madre embrionarias humanas que se hallan a una baja densidad en una placa de laboratorio se agrupan y forman un ojo en unos días (*de izquierda a derecha*).**

otros investigadores en todo el mundo, han permitido mejorar la comprensión de numerosos procesos celulares, desde el desarrollo embrionario hasta el mantenimiento y la reparación de tejidos. Además, este conocimiento puede contribuir al avance de nuevas estrategias para combatir el cáncer o generar órganos artificiales en el laboratorio.

FUERZAS DE LA NATURALEZA

Aunque nuestro cuerpo está sometido a una gran variedad de fuerzas mecánicas, la mayoría de las personas solo conoce las más obvias, como las que gobiernan el latido del corazón, la flexión muscular o el flujo sanguíneo. Sin embargo, los biólogos llevan largo tiempo estudiando la importancia de muchas de estas fuerzas de contracción y estiramiento. Así, la carga mecánica producida por el ejercicio físico promueve la mineralización de los huesos y previene la osteoporosis, mientras que la expansión rítmica de los vasos sanguíneos los protege de la arteriosclerosis.

Las fuerzas físicas ejercen también una gran influencia a escala microscópica en el organismo humano, al actuar sobre los 40 billones de células que lo componen. El origen de estas fuerzas radica en la manera en que las células se hallan conectadas entre sí. Una célula se compone de una estructura interna, el citoesqueleto, formado por unas proteínas que funcionan como cables, soportes y amarres, las cuales dan forma al núcleo, a los orgánulos y a la membrana. En la superficie externa de la membrana, unas proteínas con capacidad adhesiva conectan el citoesqueleto con el medio externo. Tales moléculas proporcionan anclaje a una red de filamentos proteicos llamada matriz extracelular, que a su vez se halla en contacto con otras células.

El citoesqueleto y la matriz extracelular conviven en un tira y afloja constante. Si la matriz se deforma y tira de los puntos que la adhieren a la célula, esta se extenderá. Pero la célula compensa estas fuerzas con una contracción interna y una reestructuración del citoesqueleto, lo que evita el estiramiento y estabiliza la forma. Se trata de un proceso dinámico que se reajusta cuando aparece otro tipo de fuerzas, las cuales provocan un cambio general de la forma celular.

A partir de la década de los setenta, se empezó a observar que las señales mecánicas que afectaban a la estructura eran esenciales para el control del crecimiento celular. Donald Ingber, del Instituto Wyss de Ingeniería Inspirada en la Biología, en la Universidad Harvard, y Fiona Watt, del Colegio King de Londres, desarrollaron métodos para modificar la forma de unas células adheridas a proteínas de matriz extracelular sobre placas de cristal. Comprobaron que las células solo crecían cuando disponían de suficiente espacio para extenderse y aplanarse; pero si se introducían en un lugar limitado, se redondeaban, dejaban de dividirse y activaban programas genéticos para diferenciarse (madurar y convertirse en tipos específicos de células) o, por el contrario, morir.

Esos resultados despertaron un enorme interés. No obstante, todavía no se entendía una parte importante del proceso. Si las fuerzas regulaban el crecimiento y la diferenciación, deberían también afectar al genoma y activar los genes responsables del crecimiento o la muerte. ¿Cuál era la conexión entre el mundo físico y el biológico? ¿Cómo pueden transformarse las fuerzas mecánicas en cambios perfectamente orquestados en la actividad de los genes?

Tales cuestiones atrajeron la atención de nuestro grupo en la Universidad de Padua. Uno de nosotros, Sirio Dupont, comenzó hace unos cinco años a seguir una serie de pistas al estilo de los mejores detectives científicos. Se sumergió en inmensas bases de datos en busca de genes que se activaran en respuesta a fuerzas mecánicas (los genes que actúan cuando se estira una célula). Más tarde buscó proteínas asociadas al control de esos genes y halló dos: YAP y TAZ.

Mediante experimentos, confirmamos que YAP y TAZ operan como un interruptor que estimula o inhibe la respuesta de la célula ante las fuerzas. Logramos controlar los cambios en la forma celular simplemente incrementando o reduciendo la cantidad de YAP y TAZ. De este modo, si aumentábamos los niveles de estas proteínas en células redondeadas y pequeñas que habían cesado de crecer, podíamos reactivar la proliferación.

El interruptor funciona del siguiente modo: cuando el citoesqueleto se estira, YAP y TAZ se dirigen desde su ubicación habitual en el citoplasma hacia el núcleo, donde se unen a sitios específicos del ADN y activan genes que inducen el crecimiento. A mayores niveles de YAP y TAZ, un número mayor de proteínas se desplazará al núcleo y provocará cambios celulares. Por el contrario, en las células redondeadas que se hallan confinadas en un espacio pequeño, YAP y TAZ no se desplazan al núcleo, sino que permanecen en el citoplasma y allí son degradadas.

A pesar de que poseen nombres distintos, YAP y TAZ se asemejan mucho en su estructura molecular y en su función.

CORTESÍA DE YOSHIKI SASAI, Centro *RIKEN* de Biología del Desarrollo

Por ello nos solemos referir a estas proteínas como una sola: YAP/TAZ.

ÓRGANOS EN FORMA

Al estudiar tejidos y órganos, nos damos cuenta de la importancia del interruptor YAP/TAZ en el funcionamiento del cuerpo humano. Pongamos por caso que nos cortamos y nos dañamos la piel. La pérdida de unas células hace disminuir la presión a la que están sometidas las que permanecen en el tejido, las cuales, al disponer de más espacio, alargan su citoesqueleto para extenderse. Este proceso de estiramiento activa la proteína YAP/TAZ, que promueve la proliferación celular. Los huecos producidos por la herida se van llenando y, una vez regenerado el ambiente compacto del tejido, el crecimiento se detiene.

Algunos experimentos con ratones han servido para entender este proceso en órganos reales. Duojia Pan, de la Universidad Johns Hopkins, demostró el papel de YAP en la regeneración celular del epitelio intestinal de animales que habían sufrido una inflamación (colitis). Asimismo, Eric Olson, del Centro Médico Suroccidental de la Universidad de Texas, observó que YAP/TAZ promovía una renovación parcial del miocardio de múridos tras un ataque cardíaco. Pero para que la regeneración resulte beneficiosa, los niveles de YAP/TAZ deben ser moderados: Elaine Fuchs, de la Universidad Rockefeller, y Fernando Camargo, del Hospital Infantil de Boston, obtuvieron ratones transgénicos que producían más YAP en la piel y observaron que su capa cutánea más externa se engrosaba y se estratificaba en exceso. Parece, pues, que si YAP/TAZ no alcanza una concentración suficiente, los tejidos no pueden regenerarse, pero su exceso se traduce en una proliferación aberrante y un mayor riesgo de tumores.

La reparación del daño en los tejidos no es el único motivo por el que YAP/TAZ resulta esencial en la salud. Muchos de nuestros órganos necesitan un recambio continuo de células, incluso en ausencia de daño o enfermedad. Esta necesidad se explica porque, si bien nuestros órganos funcionan durante décadas, las células que los componen suelen poseer una vida mucho más corta. De esta manera, la formación de células nuevas compensará la muerte progresiva de las más viejas.

El equilibrio en el número de células no constituye el único factor importante en el mantenimiento de los órganos. Otra función crucial consiste en controlar en qué lugar crecen estas. Los órganos están formados por un conjunto de distintos tipos celulares que se hallan muy próximos entre sí, como sucede en un edificio de muchos apartamentos, y dan lugar a una compleja estructura tridimensional. Esta organización espacial se mantiene generación tras generación de células. Pero ¿de dónde viene la información que determina el destino de cada célula? Estudios recientes sugieren que, una vez más, el tándem YAP/TAZ se halla tras este proceso.

Los órganos poseen una arquitectura compleja. Constan de diversas estructuras (hendiduras, bordes, curvas cóncavas y convexas, capas planas...) que se definen por la manera en que las células se asocian entre sí y con la matriz extracelular. Como el andamiaje que determina la forma de los órganos vive más que las células, este actúa como una memoria espacial para las nuevas incorporaciones, decidiendo «dónde va cada una de ellas». Pero el modo en que lo hace constituía hasta hace poco un enigma.

Los investigadores de nuestro grupo, Celeste Nelson (ahora en la Universidad de Princeton), Christopher Chen (ahora en la Universidad de Boston) y Mariaceleste Aragona, descubrieron que las variaciones en la forma del andamiaje generaban fuerzas diferenciales que afectaban al comportamiento celular. Al construir un sistema que nos permitía curvar ciertas partes de una capa de células (creando algo similar a los baches de una carretera), observamos que solo aquellas que se estiraban en áreas curvas podían activar las moléculas YAP/TAZ y proliferar. Basándonos en estos resultados, propusimos que la anatomía local y específica de los tejidos controla el comportamiento de las células que los componen a través de la activación de YAP/TAZ. El desplazamiento de estas proteínas al núcleo es máximo en las zonas donde los tejidos se estiran y se curvan, mientras que es mínimo en las superficies planas y con alta concentración de células. La arquitectura tisular crea así un molde que perpetúa la forma de los órganos a través de las distintas generaciones de células, sirviendo de memoria para aquellos componentes de nuestro cuerpo que carecen de ella.

Los niveles de YAP/TAZ deben ser los correctos; si resultan insuficientes, los tejidos no pueden regenerarse, pero su exceso se traduce en una proliferación aberrante y aumenta el riesgo de que se formen tumores

La capacidad de YAP/TAZ para detectar los cambios en el ambiente celular podría ser la clave de otro gran misterio: ¿cómo saben los órganos cuándo dejar de crecer? Antes de que nuestro laboratorio describiera el papel de YAP/TAZ en la transferencia de señales mecánicas al núcleo, estas moléculas ya habían despertado el interés de otros científicos. Se había visto que los animales con una actividad de YAP/TAZ más elevada de lo normal desarrollaban órganos gigantes. Debido a que la arquitectura de los tejidos afecta a la función de esas proteínas y las fuerzas mecánicas cambian a medida que los órganos crecen, creemos que cuando estos alcanzan el tamaño idóneo, el equilibrio resultante de fuerzas paraliza la actividad de YAP/TAZ y ello detiene el crecimiento.

La topografía constituye solo uno de los rasgos del órgano que afectan a las fuerzas mecánicas y al destino de las células. Otra característica importante es el tipo de sustrato sobre el que se asientan las células. La matriz extracelular, a la cual se adhieren estas, no es homogénea, sino que presenta diferentes texturas. Mientras que algunos tejidos, como los huesos, generan una matriz densa y rígida como una roca, otros, como el cerebro o la grasa, dan lugar a una versión mucho más suave. Es decir, la matriz de cada tejido presenta unas propiedades peculiares.

Cambios en el comportamiento celular

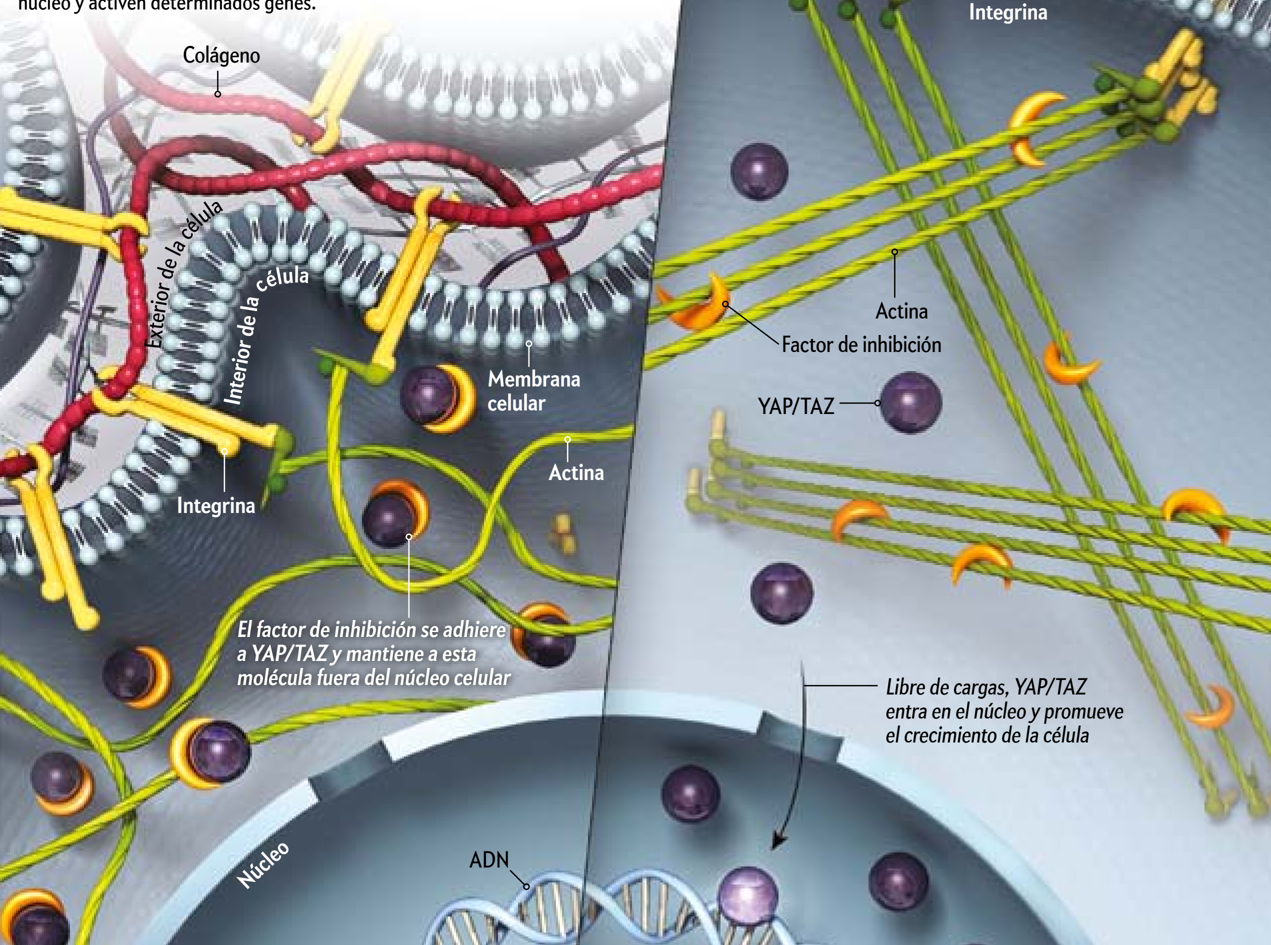
La localización en la célula de dos proteínas, YAP y TAZ (*morado*), determina si esta se dividirá o no. El movimiento de tales proteínas depende de fuerzas físicas que comprimen o estiran las células. El par YAP/TAZ detecta cambios en las fuerzas que contraen o relajan la matriz extracelular, formada por fibras como el colágeno (*rojo*). Estas fibras están ancladas a unas moléculas llamadas integrinas (*amarillo*) que atraviesan la membrana celular y sujetan el citoesqueleto interno, compuesto por fibras como la actina (*verde*). Según los estudios del laboratorio de Stefano Piccolo, en las terminaciones de actina se anclan factores inhibidores (*medias lunas doradas*) que restringen la actividad de YAP/TAZ cuando las fibras están relajadas.

Comprimida

Cuando hay una gran densidad de células, las fibras de la matriz extracelular y del citoesqueleto de la célula se relajan. Ello parece liberar factores de inhibición que se unen a YAP/TAZ, lo cual evita que estas proteínas entren en el núcleo y activen determinados genes.

Distendida

Cuando una célula dispone de espacio para extenderse, los factores de inhibición son retenidos por las fibras de actina del citoesqueleto. De esta manera, YAP/TAZ puede entrar en el núcleo y, junto con otras moléculas, activar genes que están implicados en el crecimiento y la regeneración celular.

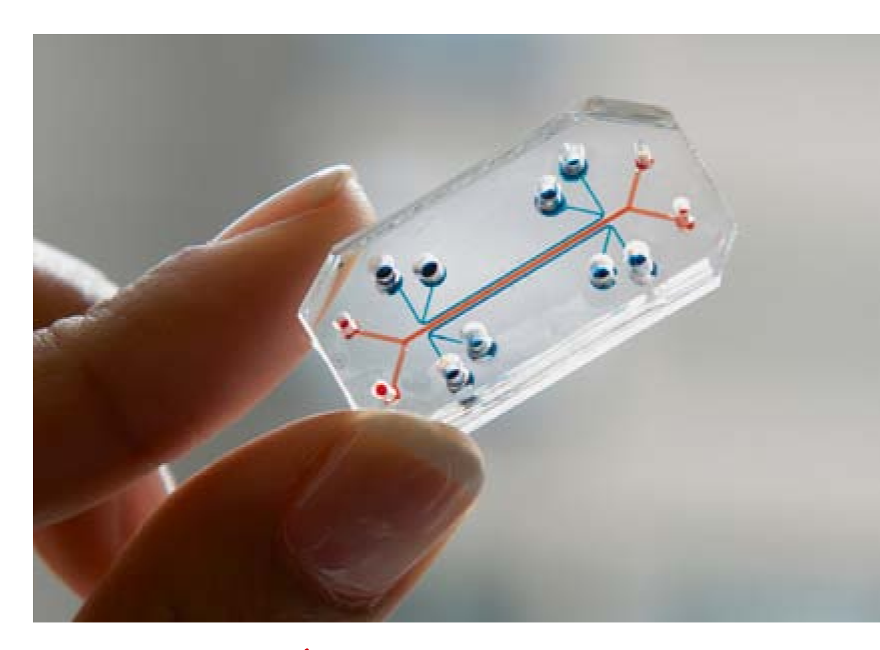


Estas propiedades parecen cruciales en el desarrollo y la regeneración de los órganos. Influyen, en particular, sobre un tipo celular muy importante: las células madre mesenquimales, que se hallan en numerosos órganos adultos y poseen capacidad reparadora. Se pueden diferenciar en una increíble diversidad de tipos celulares, como los osteocitos, los adipocitos, las neuronas o los miocitos. Durante muchos años, los biólogos supusieron que la mezcla de factores químicos en el entorno determinaba el destino de las células madre. Sin embargo, en 2006, Adam Engler y Dennis Discher, de la Universidad de Pensilvania, publicaron en

EMILY COOPER

la revista *Cell* un trabajo que cuestionaba esa teoría. Habían generado matrices sintéticas con la rigidez típica de los distintos tejidos y habían observado que las células madre dispuestas sobre estas superficies exhibían un comportamiento camaleónico. Consiguieron así que las células se convirtieran en miocitos o neuronas al entrar en contacto con matrices que poseían la rigidez característica de esos tejidos.

Cuando Dupont repitió estos experimentos en Padua descubrió que el grado de activación de YAP/TAZ en las células madre cambiaba en consonancia con la rigidez de la matriz. En las matrices rígidas, tales proteínas se hallan más activas y dirigen la transformación de las células en osteocitos, mientras que en matrices más flexibles, su actividad decae y promueven la formación de adipocitos. Mediante la modificación de los niveles y la actividad de YAP/TAZ, logramos engañar a las células madre mesenquimales. Al añadir la nueva versión de YAP/TAZ a células que se estaban convirtiendo en grasa, conseguimos que actuaran como si estuvieran en un sustrato duro y acabaran transformándose en células de hueso.



EMULADOR DE PULMÓN: Cuando en este chip se generan fuerzas que simulan la respiración, las células de pulmón y de vasos sanguíneos introducidas en él forman complejas estructuras pulmonares.

CORTESÍA DEL INSTITUTO WYSS DE INGENIERÍA INSPIRADA EN LA BIOLOGÍA, UNIVERSIDAD HARVARD

UN INTERRUPTOR TERAPÉUTICO

Las células madre han atraído la atención de la comunidad biomédica precisamente por su capacidad de transformarse en diversos tipos celulares especializados. La esperanza reside en que puedan restaurar tejidos dañados o incluso crecer hasta reemplazar órganos. Para ello, se necesita entender cómo reaccionan las células madre ante las fuerzas físicas de su entorno.

Generar músculo a partir de células madre podría ser una terapia eficaz para fortalecer el tejido dañado de pacientes con distrofia muscular. Pero esas células deben cultivarse fuera del cuerpo hasta alcanzar una población de tamaño suficiente para ejercer un efecto terapéutico. Helen Blau, de la Universidad Stanford, demostró que tal crecimiento se produce solo cuando las células madre musculares se cultivan sobre materiales que presentan la elasticidad exacta de un músculo.

La creación de órganos, algo que hasta hace poco pertenecía exclusivamente al ámbito de la ciencia ficción, depende de nuestro conocimiento sobre cómo varía la actividad celular en respuesta a señales mecánicas. En el clásico *Blade Runner*, unos científicos producían ojos en tubos de ensayo. Ahora, el equipo del tristemente fallecido Yoshiki Sasai, del Centro RIKEN de Biología del Desarrollo en Kobe, ha logrado generar ojos embrionarios en una placa de Petri. A partir de una esfera de células que flotan en una matriz extracelular elástica han observado que, una vez que esta alcanza el tamaño adecuado, las capas de células se pliegan como una figura de papiroflexia y forman estructuras oculares. Para que se produzca este asombroso fenómeno, debe suprimirse la restricción que imponen las paredes lisas de las placas de plástico al crecimiento celular. La esfera comienza entonces a obedecer a un guion interno de desarrollo, mediante una serie de operaciones mecánicas: se pliega, se estira, se curva, promueve la elasticidad de unas zonas y la rigidez de otras.

El grupo de Ingber ha demostrado que los denominados «órganos en un chip» también responden a señales físicas. En lugar de emplear placas de plástico para cultivar células, los investigadores usaron pequeños contenedores que ejercían presión a través de cantidades minúsculas de líquidos. Estos dispositivos permiten variar con una enorme precisión la fuerza aplicada y hacer que las células experimenten las condiciones mecánicas de los tejidos reales. Se sometió así a células pulmonares a ciclos de contracción y distensión, imitando los movimientos de la respiración, y también se hizo estirar y comprimir células intestinales para simular los movimientos digestivos. Al recrear los ritmos y presiones normales de nuestro cuerpo, se observaron algunos comportamientos inesperados en grupos de células indiferenciadas. Algunas de ellas se convirtieron espontáneamente en estructuras diferenciadas con el aspecto de órganos.

Si los tejidos pueden aumentar o disminuir su población de células madre a través de la regulación de YAP/TAZ, quizá nosotros también podamos servirnos de este interruptor para producir más células madre. Estas solo se ubican en regiones recónditas de los tejidos con características mecánicas especiales (en protuberancias, en el fondo de tubos huecos o en los límites de los tejidos). Es posible que estas zonas confieran a las células la capacidad de regenerarse a sí mismas y dar lugar a una progenie de múltiples tipos celulares. En varias de estas localizaciones se han identificado células madre con niveles altos de YAP/TAZ en el núcleo, lo cual incrementa su capacidad para reproducirse; tales ubicaciones parecen influir sobre los valores de estas proteínas. Mediante el diseño de nichos que se asemejen a los que hallamos en el cuerpo, se podrían generar en el laboratorio poblaciones de células madre poco frecuentes. En un futuro no muy lejano podríamos llegar a manipular células madre dentro de tejidos vivos mediante fármacos que estimulen la actividad de YAP/TAZ. O bien, emplear medicamentos que inhiban estas proteínas para detener la proliferación y hacer que las células se transformen en otras que se necesiten para reparar cierto tejido dañado.

Por desgracia, las terapias con células madre tienen un lado oscuro que puede convertirlas en ineficaces o incluso peligrosas si las células, en lugar de diferenciarse en un tipo particular, continúan creciendo sin control. Precisamente, las células madre

cancerosas (las más peligrosas) se comportan de esta manera. Esta es la razón por la que muchos de los que trabajamos en mecanobiología creemos que cualquier posible tratamiento debe asegurar que las células madre, una vez inyectadas en el paciente, acabarán en la localización correcta. De otra manera, las fuerzas físicas a las que estarán sometidas, distintas de las inicialmente previstas, podrían desencadenar mecanismos inapropiados y convertirlas en un tipo celular indeseado o en cancerosas.

MANEJAR LOS HILOS DEL CÁNCER

Mientras los expertos en medicina regenerativa intentan promover el crecimiento de las células madre para reparar tejidos dañados, los oncólogos se ocupan precisamente de lo contrario: restringir su proliferación. Una vez más, las fuerzas físicas a las que se hallan sometidas las células podrían desempeñar un papel decisivo en esta cuestión. Durante cuarenta años, la lucha contra el cáncer se ha basado en la concepción de que el crecimiento de los tumores se debe a mutaciones genéticas. A pesar de que algunas de las terapias que bloquean la actividad de estos mutantes han logrado cierto éxito, no está claro si se podría generar una nueva clase de tratamientos siguiendo esta estrategia, ya que existen demasiadas mutaciones en un solo tumor como para bloquear todas y cada una de ellas [*véase* «Heterogeneidad intratumoral», por I. Varela; Investigación y Ciencia, octubre de 2014].

Mientras que los expertos en medicina regenerativa intentan promover el crecimiento de las células madre para reparar tejidos dañados, los oncólogos se ocupan precisamente de lo contrario: restringir su proliferación

El cáncer aparece a causa de anomalías que no solo afectan a los genes, sino también al microambiente tisular. El inicio y la formación de tumores pueden ser el resultado de simples alteraciones en la forma y el entorno de las células. Los datos del laboratorio de Valerie Weaver, de la Universidad de California en San Francisco, indican que los incrementos en la rigidez de la matriz extracelular promueven un crecimiento agresivo en células que inicialmente no eran malignas.

Por otra parte, en nuestros experimentos demostramos que YAP/TAZ se activaba al forzar cambios en la forma de las células, las cuales adquirían un comportamiento canceroso. Michelangelo Cordenonsi, de nuestro grupo, descubrió que si hacía aumentar la concentración de TAZ en células normales, estas se volvían indistinguibles de las células madre cancerosas. De hecho, se ha descubierto que el interruptor YAP/TAZ se halla activo en células madre de cáncer de mama y guarda relación con el carácter maligno del tumor. Aun así, las células cancerosas no han inventado nada nuevo, sino que se aprovechan de un mecanismo ya existente a través del cual los tejidos controlan el número y la diferenciación de sus células madre.

A raíz de ese trabajo, nuestro grupo está profundizando en una idea poco ortodoxa sobre las causas del cáncer. Pensamos que la adquisición inicial de propiedades malignas no tiene por qué ir asociada a la acumulación de lesiones genéticas. En lugar de ello, el cáncer podría surgir de una alteración en la arquitectura microscópica del organismo. De ser así, la descripción clásica de los tumores como «heridas que nunca sanan» podría ser más verdad que nunca, precisamente por su tendencia a producir células sin fin, como si necesitaran reparar un daño.

Pero la reparación, que en condiciones normales es un bálsamo, podría convertirse en una maldición. Weaver suprimió la capacidad anómala de las células cancerosas de estirarse al cortar su sistema de adhesión a la matriz extracelular; logró así disminuir las señales de crecimiento y detuvo su proliferación, con lo que el tejido adquirió una apariencia normal.

Nuestro equipo alberga la esperanza de llegar a demostrar que YAP/TAZ es el talón de Aquiles del cáncer. Dado que la sobreactivación de estas proteínas representa un elemento común en muchos tipos de tumores, su inhibición podría ayudar a normalizar el comportamiento celular o a prevenir la metástasis. Tal estrategia ya está siendo objeto de estudio por varios grupos.

Aun así, somos conscientes de que el cáncer es una enfermedad compleja y de que, en los diversos tipos de tumores, hay distintos mecanismos que conectan las fuerzas externas con los genes. Ello explicaría que algunos tratamientos que parecían prometedores en el laboratorio no lograran el efecto esperado en los pacientes. El reto consiste en desarrollar un inhibidor de YAP/TAZ cuya acción se concentre en las células madre tumorales y no afecte a las normales. Otra opción sería emplear fármacos que, al relajar la rigidez del citoesqueleto o de la matriz extracelular, ejercieran un efecto indirecto sobre el crecimiento tumoral.

Para Aristóteles, la forma era el alma de los seres vivos. Hoy, los biólogos celulares están empezando a reconocer el papel fundamental de la forma en la vida: por una parte determina el modo en que las células construyen y reparan órganos, y por otra, puede volverse anómala y afectar a la salud. Al seguir ampliando nuestro conocimiento sobre el poder de la forma, esperamos algún día lograr modificarla a nuestro antojo y con ello mejorar la vida de las personas.

PARA SABER MÁS

Control of stem cell fate by physical interactions with the extracellular matrix. Farshid Guilak et al. en *Cell Stem Cell*, vol. 5, n.º 1, págs. 17-26, julio de 2009.
Reconstituting organ-level lung functions on a chip. Dongeun Huh et al. en *Science*, vol. 328, págs. 1662-1668, junio de 2010.
Why don't we get more cancer? A proposed role of the microenvironment in restraining cancer progression. Mina J. Bissell y William C. Hines en *Nature Medicine*, vol. 17, págs. 320-329, marzo de 2011.
Transduction of mechanical and cytoskeletal cues by YAP and TAZ. Georg Halder et al. en *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 13, págs. 591-600, septiembre de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Geometría biológica. Donald E. Ingber en *IyC*, marzo de 1998.
Mecánica de la migración celular. Xavier Trepat en *IyC*, noviembre de 2009.
Cultivo ocular. Yoshiki Sasai en *IyC*, enero de 2013.
Una forma indirecta de domar el cáncer. Rakesh K. Jain en *IyC*, abril de 2014.

por Javier Veloso, Claude Alabouvette, José Díaz

La microbiota de la raíz

Un aliado fundamental para la defensa y nutrición de las plantas

Las raíces constituyen uno de los ecosistemas más diversos de la Tierra. Algunos de los microorganismos que alberga el suelo se asocian con ellas y forman la rizosfera. En esta capa de suelo que rodea a la raíz, no superior al milímetro de espesor, las comunidades microbianas son distintas de las del resto del bioma edáfico.

La microbiota radicular ejerce un papel fundamental en la nutrición de la planta y en su defensa frente a las enfermedades. Al igual que la microbiota intestinal de los humanos, las bacterias y hongos que tapizan la superficie de la raíz aumentan la capacidad de la planta para obtener nutrientes y la protegen frente a los microorganismos patógenos.

Las raíces establecen redes de intercambio con hongos, los cuales amplían la superficie de absorción y suministran a la planta sustancias minerales a cambio de hidratos de carbono. Otros microbios con los que se asocian sintetizan enzimas hidrolíticas que ayudan a solubilizar los fosfatos y otros nutrientes minerales del suelo, lo que permite su asimilación por las plantas. Las enzimas ayudan también a erosionar las rocas y facilitan la penetración de las raíces.

La microbiota protege a la planta de los patógenos microbianos principalmente mediante dos mecanismos. Por un lado, impide que estos colonicen las raíces, ya que compite con ellos por los nutrientes, o los destruye antes de que puedan causar infecciones. Por otro lado, la microbiota desencadena una respuesta específica en la planta, la resistencia inducida, la cual estimula la capacidad del sistema inmunitario vegetal para hacer frente a los organismos perjudiciales.

Algunas de las especies beneficiosas de la rizosfera se emplean en la agricultura para incrementar el rendimiento del suelo y potenciar el crecimiento de los cultivos sin necesidad de usar suplementos minerales [*véase* «Tierra prodigiosa», por Richard Conniff; Investigación y Ciencia, noviembre de 2013]. Además, al mitigar la incidencia de las enfermedades vegetales, se reduce la aplicación de plaguicidas, de modo que los alimentos contienen menos sustancias potencialmente perjudiciales para la salud humana. En nuestro grupo estamos investigando la ventaja de añadir ciertas cepas de hongos presentes en el suelo, en concreto del genero *Fusarium*, para proteger plantas de cultivo.

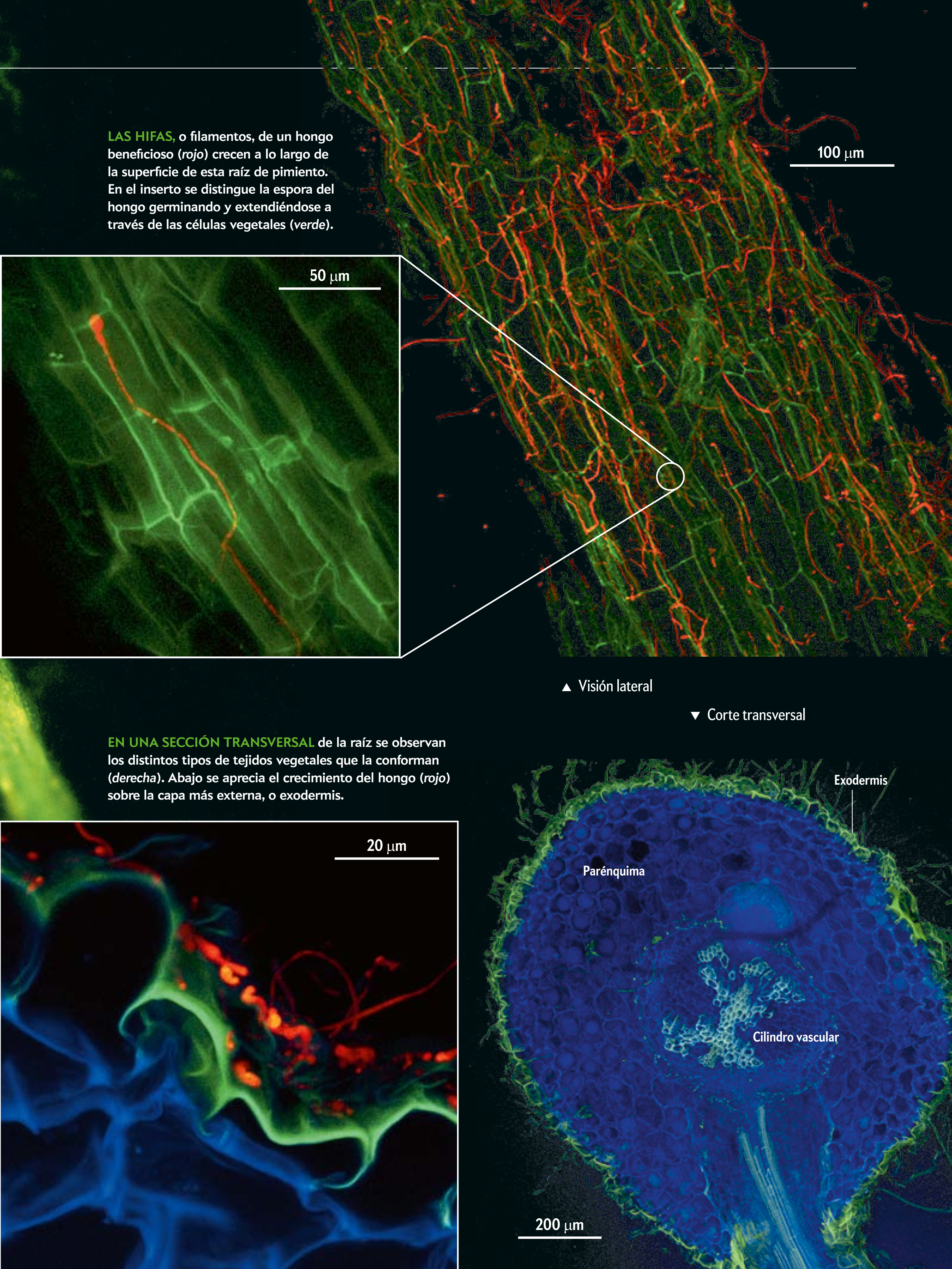
—Javier Veloso y José Díaz
Departamento de biología animal, biología vegetal y ecología
Facultad de ciencias
Universidad de La Coruña

—Claude Alabouvette
Unidad mixta de Microbiología del Suelo y del Medio Ambiente
INRA y Universidad de Borgoña
Dijon

1 mm

RAÍZ DE PIMIENTO (*Capsicum anuum*). En esta imagen superficial del órgano se aprecia la morfología típica y la autofluorescencia natural de los tejidos radiculares.

IMÁGENES CORTESÍA DE JAVIER VELOSO, OBTENIDAS MEDIANTE MICROSCOPÍA DE EPIFLUORESCENCIA (*página izquierda*) Y MICROSCOPÍA CONFOCAL (*resto de imágenes*)



LAS HIFAS, o filamentos, de un hongo beneficioso (*rojo*) crecen a lo largo de la superficie de esta raíz de pimiento. En el inserto se distingue la espora del hongo germinando y extendiéndose a través de las células vegetales (*verde*).

EN UNA SECCIÓN TRANSVERSAL de la raíz se observan los distintos tipos de tejidos vegetales que la conforman (*derecha*). Abajo se aprecia el crecimiento del hongo (*rojo*) sobre la capa más externa, o exodermis.

por Mirjam Brusius



Mirjam Brusius es investigadora posdoctoral Mellon en historia de la fotografía en la Universidad de Oxford.

Los múltiples objetos de William Henry Fox Talbot

En el 175 aniversario del nacimiento de la fotografía, fuentes de archivo inéditas amplían nuestra perspectiva sobre la obra de uno de sus inventores

La celebración en 2014 del 175 aniversario de la fotografía ha renovado el interés por su historia. En 1839, el francés Louis-Jacques-Mandé Daguerre (1787–1851) y el británico William Henry Fox Talbot (1800-1877) anunciaron de forma simultánea el descubrimiento de un procedimiento para registrar imágenes a través de la luz. Sin embargo, sus técnicas eran muy diferentes: los daguerrotipos de Daguerre eran copias únicas sobre una placa plateada; la calitipia de Talbot, en cambio, generaba una imagen en negativo que podía reproducirse muchas veces —se convertiría en la técnica más usada hasta la introducción de la fotografía digital—. La procedencia de ambos pioneros era también muy distinta: Daguerre era escenógrafo y pintor de panoramas, mientras que Talbot era un *gentleman* victoriano que podía dedicar su tiempo y su dinero a la ciencia y el estudio.

Talbot empezó a experimentar con la fotografía en 1833 y presentó su invención a la Institución Real y a la Real Sociedad de Ciencias, ambas británicas, en 1839. La década de 1830 fue una de las más productivas de su vida. Hoy se le recuerda, sobre todo, por la invención del método fotográfico de positivo-negativo (la disposición de su archivo respalda esta idea, ya que los cuadernos de fotografía se hallan separados del resto de documentos). Sin embargo, esta sería una visión parcial de su obra. Si bien Talbot goza de un estatus monumental como autor de algunas de las imágenes icónicas de los inicios de la fotografía, este no era para él sino uno más de sus múltiples intereses, que abarcaban no solo las ciencias naturales sino también el estudio de la Antigüedad. Estas otras actividades no se han valorado hasta ahora en sus propios términos, sino en la medida en que contribuyeron al desarrollo de la fotografía. Las fotografías de Talbot se han considerado obras de arte, una lectura que se ha visto reforzada por su elevado valor de mercado. Sin embargo, es preciso contextualizar la labor del británico y revelar las redes materiales e intelectuales que la sustentaban.

Las nuevas condiciones de acceso a los archivos de Talbot nos permiten abordar esa tarea. La inmensa colección de cuadernos de investigación, cartas, documentos y objetos que dejó tras de sí documenta su actividad en múltiples campos científicos. En 2003, en el marco de un proyecto dirigido por el historiador de la fotografía Larry J. Schaaf, se publicó íntegramente en línea la correspondencia de Talbot. Las cerca de 10.000 cartas que componen esta edición muestran que pertenecía a una importante red de académicos y estudiosos. Sus cuadernos (que empezó a escribir a los diez años) y los archivos de algunos de sus corresponsales complementan tan valiosa fuente de información.

En 2006, la familia Talbot donó 360 de esos cuadernos a la Biblioteca Británica, junto con especímenes naturales, fotografías, diarios, cartas, separatas de sus artículos, patentes, artefactos y una pequeña selección de libros procedentes de la biblioteca de Lacock Abbey, en el condado de Wiltshire, donde vivió durante su niñez. La Biblioteca Bodleiana de Oxford



DEL LÁPIZ A LA CÁMARA OSCURA: Talbot tomó varias fotografías de su copia personal en yeso de un busto de Patroclo conservado en el Museo Británico. Experimentó con diferentes ángulos y técnicas de iluminación, tratando de dar vida a la escultura. Con ello demostró la utilidad de la fotografía en el estudio del arte antiguo y las ciencias, basado hasta entonces en dibujos a lápiz.

ha adquirido en fecha reciente otros documentos relevantes, como algunas de las primeras fotografías de Oxford y nuevas cartas y diarios. Este nuevo archivo incluye una imagen tomada en 1839 por la mujer de Talbot, Constance, probablemente la primera fotografía realizada por una mujer. El archivo se completa con partituras, instrumentos científicos, herbarios, dibujos y diarios de miembros de la familia, y una colección de fotografías de Talbot y otros autores. Estos objetos y documentos nos invitan a prestar atención a la dimensión material de la vida científica e intelectual del siglo xix.

Los archivos de Talbot revelan a un intelectual creativo, inmerso en las redes e instituciones de la sociedad victoriana. Su trayectoria plantea cuestiones fundamentales sobre la relación entre la fotografía y otros campos. Las imágenes de Talbot poseen un valor estético innegable, pero no pueden reducirse a obras de arte, porque reflejan los intereses académicos de su autor y funcionan como una herramienta científica. La mirada de Talbot era la de un científico apasionado por la Antigüedad, un experto conocedor de los objetos que retrataba.

Los historiadores de la fotografía han debatido sobre los orígenes de la nueva técnica. ¿Cabe emplazarla en la historia de las tradiciones pictóricas? ¿O se sitúa fuera del arte porque es automática? Talbot se encuentra en el origen de esta discusión sobre el estatus estético y probatorio del nuevo medio. En ese momento estaba cambiando el significado de los términos *arte* y *ciencia*. Para Talbot no eran en absoluto opuestos; por ello se refería a su descubrimiento como «un nuevo arte», al tiempo que se esforzaba por darlo a conocer entre el «público científico».

La intensa actividad fotográfica de Talbot durante el decenio de 1830 dio paso, a mediados del decenio siguiente, a otras actividades. Los historiadores del arte han dado por sentado que Talbot dedicó el año 1839 a difundir y perfeccionar su técnica fotográfica frente a la de su rival Daguerre. Pero ese mismo año publicó un pequeño volumen titulado *La Antigüedad del libro del Génesis*, una contribución al estudio de la influencia del Génesis en las religiones de las civilizaciones antiguas. También publicó el segundo volumen de *Hermes. Investigaciones sobre la Edad Antigua y la Antigüedad clásica*, en el que exploraba las tradiciones antiguas de Grecia, Italia y Egipto. La importancia atribuida a su actividad fotográfica no

Para Talbot, arte y ciencia no eran en absoluto conceptos opuestos

permite comprender el interés de Talbot por estos proyectos.

Talbot cultivó con entusiasmo, a lo largo de su vida, los estudios clásicos y antiguos. Durante la etapa de estudiante en Cambridge ganó el Premio Porson de Poesía Griega (1820), y sus primeros trabajos publicados trataron sobre la Antigüedad clásica. Su archivo contiene un gran número de cuadernos con anotaciones sobre etimología y filología que datan del mismo período en que desarrolló la fotografía. A partir del decenio de 1850, Talbot dedicó mucho tiempo a descifrar la escritura cuneiforme, como atestiguan el centenar de cuadernos asiriológicos. Coincidiendo con la llegada a Londres de los primeros objetos excavados en Mesopotamia, defendió el uso de la fotografía en arqueología y su valor para dirimir disputas filológicas.

Durante sus estudios en Cambridge, Talbot destacó asimismo en matemáticas, concebidas entonces en la universidad no solo como una herramienta científica fundamental, sino también como un elemento integral de la educación de un *gentleman*. Sus cuadernos nos dicen que practicó la botánica y llevó a cabo investigaciones pioneras de química y óptica durante las décadas de 1820 y 1830. Como miembro de la Sociedad Real británica, perteneció a la élite científica en un período crucial de profesionalización.

Los intereses académicos de Talbot se pueden rastrear en sus cuadernos; sus fotografías los complementan. Para él, los objetos podían registrarse sobre un papel del mismo modo que los pensamientos se anotaban en las cartas y los cuadernos. La fotografía y la anotación comprenden los distintos métodos de producción de conocimiento en toda su amplitud: leer, registrar, memorizar, estudiar, coleccionar, descifrar, clasificar, intercambiar y difundir.

En su libro *El lápiz de la naturaleza*, Talbot defendió la aplicación de la fotografía al estudio de las ciencias y el pasado. Se trataba casi de una cuestión personal. Necesitaba las fotografías para descifrar las tablillas de arcilla cuneiformes del Museo Británico. Pero, ¿era la fotografía una herramienta para la ciencia? Pese a que en 1843 recomendó al museo que contratara a un fotógrafo para documentar los objetos y asistir en las excavaciones, pasarían quince años antes de que alguien atendiera su petición. La fotografía devino lentamente una técnica indispensable para el estudio y la representación. Si en determinados contextos se apreciaba la aproximación fotográfica, en otros se la criticaba por ser una copia imperfecta, menos útil o evocadora que el original o un dibujo. Irónicamente, al final de su vida Talbot reconoció las limitaciones del medio para el estudio de las inscripciones antiguas, y admitió la necesidad de la litografía y el dibujo.

PARA SABER MÁS

Some account of the art of photogenic drawing, or the process by which natural objects may be made to delineate themselves without the aid of the artist's pencil. William Henry Fox Talbot. R. and J. E. Taylor. Londres, 1839.

The antiquity of the Book of Genesis illustrated by some new arguments. William Henry Fox Talbot. Longman, Orme, Brown, Freen&Longmans, Londres, 1839.

Hermes, or classical and antiquarian researches. Vol. I y II. William Henry Fox Talbot. Longman, Orme, Brown, Freen&Longmans, Londres, 1839.

The pencil of nature. William Henry Fox Talbot. Longman, Orme, Brown, Freen&Longmans, Londres, 1844-46.

Out of the shadows. Herschel, Talbot & the invention of photography. Larry J. Schaaf. Yale University Press, New Haven y Londres, 1992.

Huellas de Luz: El arte y los experimentos de William Henry Fox Talbot. Catherine Coleman et al. Aldeasa y Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, Madrid, 2001.

William Henry Fox Talbot: Beyond photography. Mirjam Brusius, Katrina Dean y Chitra Ramalingam. Yale University Press, New Haven y Londres, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las primeras fotografías en color. Grant B. Romer y Jeannette Delamoir en *IyC*, febrero de 1990.

La invención de la fotografía, recuperada. Jean-L. Marignier y Michel Ellenberger en *IyC*, junio de 1997.

por Esther Rubio Herráez

Esther Rubio Herráez, doctora en ciencias químicas y profesora de física y química, pertenece al Instituto de Investigaciones Feministas de la Universidad Complutense de Madrid.



Las mujeres en la ciencia de hoy

Todavía limitadas por un sistema basado en desigualdades estructurales

El pasado 4 de noviembre, Fabiola Gianotti fue elegida para dirigir el CERN a partir de enero de 2016. Esta nominación habría pasado inadvertida si no hubiera sido porque es la primera vez que, en los sesenta años de historia de la institución, una mujer va a desempeñar la máxima responsabilidad en el organismo europeo.

Las mujeres con vocación científica esperan —igual que los hombres— poder convertir su pasión en carrera profesional. Sin embargo, en la práctica, ellas se encuentran con obstáculos que lo dificultan. Son barreras debidas a desigualdades, sutiles pero persistentes, que desmienten la supuesta neutralidad que envuelve la cultura de la ciencia. La carrera científica de las mujeres se ve limitada por el androcentrismo que subyace al sistema y por sesgos sexistas cotidianos y poco visibles.

En la actualidad disponemos de numerosos estudios sobre las razones económicas, políticas e ideológicas que sustentan las desigualdades y limitan la participación femenina en el campo científico, así como las consecuencias que esto tiene para ellas y para la propia ciencia. A esta tarea han contribuido de forma sustancial las investigaciones feministas y los estudios de las mujeres, pues, además de desvelar los obstáculos y barreras que ellas encuentran en la práctica científica, han planteado preguntas que han permitido ir al fondo de la cuestión: ¿Cómo se ha construido la ciencia? ¿Cómo se constituye y organiza? ¿Cómo influyen los sistemas políticos en su diseño y desarrollo? Son preguntas cortas que requieren largas respuestas que aquí no podré abordar. Me limitaré a señalar algunos de los hallazgos más fácilmente perceptibles.

El sistema español de la ciencia se inscribe en un marco muy tradicional, sustentado en las desigualdades y jerarquías sexuadas clásicas. Tras una pretendida neutralidad se esconde la masculinidad como principio estructurador. Son los científicos quienes ocupan mayoritariamente los equipos de dirección de las instituciones y de las revistas científicas, los jurados de becas y subvenciones, y los comités y las agencias de política científica. Ello contribuye a que la ciencia contemporánea sea contemplada como un campo masculino: pertenece a los hombres y oculta a las mujeres. Algo difícil de sostener en la actualidad, dada la amplia presencia de científicas —son ya muchas y están en todos los campos— y su protagonismo —sus investigaciones son relevantes—. No obstante, la proporción de mujeres en los puestos de poder sigue siendo muy pequeña: 13 % de catedráticas de universidad (*Mujer y ciencia: La situación de las mujeres investigadoras en el sistema español de ciencia y tecnología*, FECYT, 2007) y 20 % de directoras de centros de investigación del CSIC (*Informe Mujeres Investigadoras 2014*, CSIC), por mencionar algunos datos.



THINKSTOCK/JORGENMAC

Existe también una desigual valoración de la labor de mujeres y hombres: ante trabajos idénticos, la calificación es más alta para los que se creen producidos por hombres. Como denunciaron en 1997 en *Nature* Christine Wennerås y Agnes Wold, ambas de la Universidad de Goteborg, en su famoso artículo «Nepotism and sexism un peer-review», la evaluación de las mujeres en ciencia presenta sesgos sexistas.

Asimismo, los artículos que tienen a una mujer como primera autora son menos citados; ellas cuentan con menos apoyos debido a lo que las angloamericanas llaman *boys clubs* («clubs de chicos»); disponen de dotaciones materiales y humanas inferiores; tienden a minusvalorarse a la hora de elaborar su currículum vítae o su autoevaluación; y tanto el trato como las relaciones son abiertamente desiguales. También el éxito y el fracaso se asocian a distintas causas según se trate de mujeres o de hombres. En ellas el éxito se atribuye más al esfuerzo que a sus capacidades o a factores externos como la suerte; en ellos, en cambio, se supone basado en la competencia personal y méritos propios. En un sentido inverso, el fracaso de las mujeres se debe a la incompetencia, y el de los hombres, a la mala suerte.

Son todas desigualdades poco visibles y difíciles de percibir, sobre todo por las jóvenes científicas, que tienden a pensar que lo que les sucede es a título personal, hasta que al hablarlo con otras colegas se dan cuenta de que no se trata de un problema individual sino colectivo.

El conocimiento más hondo de la situación cuestionó las primeras iniciativas para combatir las desigualdades de género en la ciencia, que pretendían adaptar las niñas y las mujeres al sistema (masculino) de enseñanza e investigación. Hoy, en cambio, el énfasis se pone en cambiar el sistema, dejando atrás percepciones victimistas. Se ha puesto en evidencia que el problema no reside en las mujeres sino en la estructura de la ciencia.

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.



Pizza

La ciencia que se esconde en la masa

Las masas de harina fermentadas y cocidas son comunes en numerosas regiones. Podemos pensar en la catalana *coca de recapte* o el alsaciano *Flammekueche*. Pero la más famosa de todas es, sin duda, la pizza. Según Davide Cassi, profesor de física de la Universidad de Parma y experto en la relación entre ciencia y cocina, la clave de la pizza es la masa. No solo por sus ingredientes (harina, agua, levadura y sal), sino, sobre todo, por la elaboración, que entraña un variado abanico de transformaciones fisicoquímicas.

Centrémonos en la pizza típica, la napolitana. El tiempo, los movimientos y las presiones de su amasado influyen en la formación del gluten, la estructura proteínica que sustenta las burbujas de dióxido de carbono derivadas de la fermentación (metabolización de los hidratos de carbono por parte de la levadura). Según Cassi, el amasado debe ser largo y la masa debe estirarse horizontalmente, sin aplastar, para evitar la presencia de demasiados enlaces del gluten verticales, que endurecerían la masa (porque impiden que esta se levante durante la cocción, lo que aumenta su densidad).

Un primer amasado largo con fermentación, seguido de un segundo amasado breve, también con fermentación, aseguran el éxito del proceso, porque logran que el tamaño de las burbujas formadas sea más homogéneo.

La temperatura del horno debe ser muy elevada, superior a los 300 ºC. Ello permite obtener un exterior crujiente y un interior blando, y garantiza que la masa se hinche debido a la evaporación del agua. Al final de la cocción se produce el típico hinchado de los bordes (*cornicione*). Ello sucede porque, por un lado, esa zona es la más gruesa y, por tanto, es la que puede ganar más volumen; por otro, el aire tiende a salir por los bordes.

Idealmente, los hornos deben ser de piedra, ya que permiten la transmisión de calor por conducción (contacto). Para evitar que se queme la suela de la masa, se cubre la piedra con una capa de harina. En hornos con planchas metálicas se pone aceite con la misma intención. A la parte superior llega, por radiación, un gran calor, que provoca una pérdida de agua y la fundición del queso. En el interior de la masa, a temperaturas bajas (entre 60 y 70 ºC), se produce la gelificación del almidón, y a temperaturas un poco más altas (entre 80 y 90 ºC), la coagulación de las proteínas del gluten.

A la masa cocida y aliñada solo con un poco de aceite se la denomina pizza blanca. La margarita es la pizza por excelencia, creada en junio de 1889 para Margarita de Savoia por Raffaele Esposito en la pizzería Brandi, en Nápoles. Sus ingredientes son el tomate, la *mozzarella* y la albahaca, que representan los colores de la bandera italiana. Otras de las más consumidas son la marinera y la de cuatro quesos.

Para elaborar una pizza en casa, lo primero que haremos será precalentar el horno, al menos durante una hora, a la máxima potencia arriba y abajo (sin aire). En cuanto a los ingredientes, lo mejor es utilizar masa madre (la que se obtiene cuando dejamos fermentar espontáneamente una mezcla de harina, agua y sal). De no ser posible, compraremos levadura y la mezclaremos con un poco de agua y azúcar para activarla (la aparición de burbujas indica que ya está lista). Añadiremos harina y agua en proporción 2 a 1 y amasaremos. Añadiremos luego un poco de sal, siguiendo con el amasado horizontal. Al final haremos una bola para poder estirarla mejor. La dejaremos fermentar unas horas y terminaremos con un segundo amasado breve y una última fermentación.

A la mitad de la cocción, rociaremos con aceite la superficie de la pizza para evitar que se queme. Podemos añadir orégano o albahaca, pero siempre hacia el final, para evitar que pierdan el aroma.

Si compramos una pizza precocinada, deberemos tener en cuenta que probablemente estará humedecida por el agua del tomate y el queso. Para recuperar la textura crujiente, precalentaremos el horno con aire para conseguir una rápida deshidratación.

Bryony James, de la Universidad de Auckland en Nueva Zelanda, y sus colaboradores publicaron el pasado agosto en la revista *Journal of Food Science* un trabajo que pretendía demostrar, mediante numerosos experimentos, que el mejor queso para la pizza era la *mozzarella*. Según Cassi, se trata de un planteamiento absurdo. No existe una forma objetivamente perfecta de elaborar un plato, puesto que nuestra experiencia al degustarlo no depende solo de los parámetros fisicoquímicos del alimento, sino también de otros factores subjetivos (gustos, cultura, etcétera). La *mozzarella* resulta indicada para la pizza básicamente porque es un queso neutro y permite apreciar al máximo los sabores. No hay que darle más vueltas.

Otro ejemplo de aproximación científica a la pizza corresponde al libro que Harold J. Morowitz publicó en 1991: *The thermodynamics of pizza* (Rutgers University Press, traducido al castellano en 1998 por Gedisa). Quería averiguar por qué las pizzas a domicilio se mantienen calientes durante tanto tiempo en su caja de cartón. Tras analizar la pizza como si se tratara de tres discos superpuestos (masa, tomate y queso), concluye que la clave reside en el queso (alcanza temperaturas muy elevadas y aguanta mucho el calor), la capa de aire y la de cartón (ambas aislantes térmicos). Evidentemente, se trata de un modelo demasiado simplista que no responde a la realidad. Una pizza es algo mucho más complejo... y sabroso.





CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,50€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA** Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA** Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION** Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA** Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA** Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS** Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA** El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **MEDIOAMBIENTE** Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS** Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. **LUZ Y TÉCNICA** La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. **ENERGÍA** Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar su pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

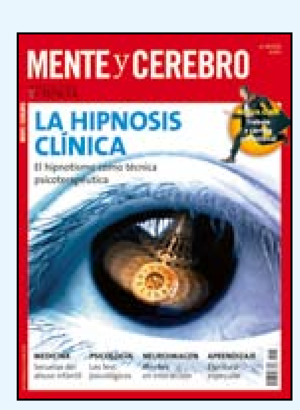
CATÁLOGO DE PRODUCTOS

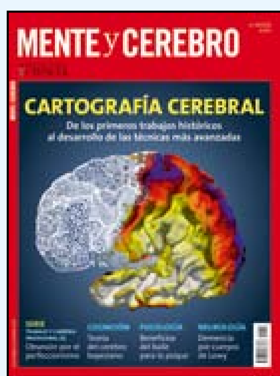
MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner

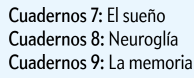
(*) Disponible solo en formato digital





Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria







LAS FLORACIONES DE HIELO no son producto de la condensación del vapor contenido en el aire, como en el caso de la escarcha, sino de la exudación y congelación del agua presente en el tallo de las plantas (*en la imagen, un tallo cortado visto desde arriba*).

BIOFÍSICA

Flores y ribetes de hielo

En determinadas condiciones, el agua se congela y da lugar a estructuras de gran belleza que desafían la fuerza de la gravedad

James R. Carter

ABANDONAR EL CALOR DE LA CAMA EN UNA MADRUGADA DE INVIERNO PARA IR DE EXCURSIÓN AL bosque quizá no resulte fácil para algunos, pero los tesoros visuales que allí nos aguardan pueden compensar con creces nuestro esfuerzo. Si se reúnen las condiciones meteorológicas adecuadas y la flora local es la ideal, podemos descubrir efímeras y delicadas formaciones que brotan de los tallos de determinadas plantas y configuran, literalmente, un jardín de hielo.

Vi por primera vez tales esculturas naturales en diciembre de 2003, mientras hacía senderismo en Tennessee. No pude dar explicación a ese fenómeno hasta que no consulté Internet. Al año siguiente encontré, en una región distinta, formaciones similares que se asociaban a otro tipo de planta. Una mañana helada de noviembre de 2005 conducía por el norte de Kentucky ojo avizor ante la posibilidad de dar con nuevos hallazgos. El primero de ellos resultó ser ilusorio (solo unas bolsas de basura de plástico), pero el segundo demostró ser auténtico hielo en tallos de plantas. En aquella ocasión lo observé a lo largo del borde de la carretera, donde se había cortado la maleza. De los tallos verticales seccionados brotaban remolinos de hielo que se extendían en todas direcciones.

Observé las estructuras durante unas horas mientras conducía hacia el sur, lo cual indicaba que la región albergaba la especie vegetal necesaria y se daba la combinación ideal de temperatura y humedad. Proseguí mis exploraciones para conocer con mayor detalle los factores que se requieren para originar semejantes maravillas visuales. Al cabo de unos días, en una mañana con temperaturas bajo cero y después de un día de lluvia, salí en busca de más flores de hielo en el centro de Virginia. Las hallé en tres formatos distintos a lo largo de una carretera polvorienta: ribetes de hielo en la base de tallos de pequeñas plantas, agujas de hielo que levantaban una fina capa de suelo y una diminuta barra de hielo que sobresalía unos cinco centímetros por encima de la superficie. Al año siguiente regresé al lugar de mi primer hallazgo en Tennessee y recolecté semillas de una de aquellas plantas sobre las que se formaba el hielo, en concreto *Verbesina virginica*, y las sembré en el jardín de mi casa en Illinois. El invierno siguiente ya contaba con mis propias flores de hielo, lo que me permitió observar su proceso de formación y comenzar a dilucidar los factores que lo condicionan.

ESTUDIOS PIONEROS

Para desentrañar los secretos de las flores de hielo, aproveché ciertos datos históricos. Estas raras formaciones se conocen des-

de hace tiempo y existen descripciones publicadas que datan de comienzos del siglo XIX.

Sir John F. W. Herschel, hijo del astrónomo que descubrió el planeta Urano y excelente científico por sí mismo, redactó un trabajo de gran interés. En 1833, publicó un artículo ilustrado en la revista *Philosophical Magazine* de Londres y Edimburgo, donde describía que el hielo «parecía emanar de una especie de excrecencia ondulada en forma de galón o volante, como si fluyera en estado blando desde el interior del tallo a través de fisuras longitudinales laterales; la estructura de los galones era fibrosa, similar a la variedad fibrosa del yeso, y su superficie presentaba un brillo sedoso».

Al parecer, las anotaciones de Herschel dieron pie a una serie de estudios relacionados con el fenómeno. En un número de 1850 de la mencionada revista, el físico y naturalista John LeConte, de la Universidad de Georgia, exponía sus observaciones sobre tallos que producían hielo, tanto enteros como cortados. Reparó en que muchos de ellos se hallaban muertos o secos en la época del año en que realizaba su estudio, aunque las raíces siguieran vivas. Luego la formación de hielo no parecía guardar relación con las funciones fisiológicas de la planta. Apuntó que «de lejos, las figuras adquieren una apariencia similar a mechones de algodón, cuyo diámetro oscila entre diez y trece centímetros, diseminadas entre la base de las plantas; cuando se encuentran en gran número, ofrecen un asombroso espectáculo de enorme belleza».

En 1892, el naturalista estadounidense William Hamilton Gibson describió que el hielo «resplandece como motas de cuarzo blanco entre la vegetación arrasada, cerca de la base del tallo. Es una flor formada por cristales de hielo, de un blanco inmaculado, que brota del tallo; rompe la corteza y adopta todo tipo de formas caprichosas y ligeras con aspecto de rizos, rebordes y crestas». Destacó que el volumen de las estructuras excedía al de la savia producida por una planta, lo que implicaba un aporte adicional de humedad procedente del suelo.

Otros investigadores de aquella época estudiaron los aspectos de la fisiología vegetal relacionados con la producción de flores de hielo. William Coblentz, físico de la Oficina Nacional de Estándares de EE.UU. en Washington D. C., llevó a cabo uno de los trabajos más detallados. En 1914, cortó una serie de tallos de plantas y los insertó en suelo húmedo en su laboratorio. Demostró así que las raíces no desempeñaban ninguna función en la formación de los rizos de hielo y que estos no surgían como consecuencia de la condensación del agua contenida en el aire (como sucede con la escarcha).

CULTIVAR UN JARDÍN DE HIELO

Un siglo después, las flores de hielo siguen planteando interrogantes. Ni siquiera existe un consenso acerca de su denominación. Se suele referir también a ellas como filamentos de hielo o flores de escarcha. Pero este último nombre no resulta muy apropiado, ya que su origen difiere del de la escarcha. Bob Harms, del Centro de Recursos Botánicos de Austin, de la Universidad de Texas, ha propuesto la denominación *crystallofolia* (en latín, «hojas de hielo») para describir estas formaciones inusuales. (En ocasiones se originan estructuras de la misma extravagancia sobre rocas y tuberías.)

Cuando comencé a cultivar mis propias flores, me propuse conocer todo lo posible acerca del fenómeno, aunque existen escasos estudios exhaustivos sobre él. No todas las plantas generan hielo. He recopilado trabajos que describen cuarenta especies de distribución mundial que lo producen. Aparentemente, todas ellas corresponden a especies herbáceas, es decir, carecen de tallos leñosos, y sus hojas y brotes mueren cuando la estación de crecimiento llega a su fin. A pesar de que la mayoría de las flores de hielo se asocian con tallos muertos, algunas se originan en tallos verdes; se forman cuando se aproxima el final de la estación de crecimiento, si se dan las condiciones ideales de temperatura. Por otro lado, existe una variedad de hielo filamentoso que crece en la madera muerta.

Harms ha apuntado algunos detalles sobre las plantas que forman hielo. Ha advertido que la totalidad de sus tallos presentan prominentes radios del xilema, unos vasos que transportan la savia desde el centro del tallo hasta su periferia. Puesto que las flores de hielo crecen perpendiculares al tallo, es de esperar que dichos vasos aporten el líquido que origina las estructuras. Harms postula que las plantas que no producen hielo poseen radios del xilema menos desarrollados. Además, ha identificado el rango exacto de espaciado de poros y permeabilidad al agua que permite a ciertas plantas transformar el agua líquida en unas formas tan específicas de hielo.

Por otro lado, el proceso por el que se genera hielo cuando el agua emerge del tallo es bien conocido. Se denomina segregación de hielo, mecanismo por el cual el agua que circula a través de un medio (ya sea el tallo de una planta, un fragmento de madera, suelo o roca) se congela en una superficie más fría. En 1989, Hisashi Ozawa y Seiiti Kinosita, de la Universidad de Hokkaido, demostraron la existencia de dicho proceso colocando un cristal de hielo sobre un filtro microporoso que a

Continúa en la página 61

James R. Carter es profesor emérito en el departamento de geografía y geología de la Universidad del Estado de Illinois.



EN SÍNTESIS

Bajo determinadas condiciones meteorológicas, sobre los tallos secos de ciertas especies de plantas aparecen unas estructuras de hielo espectaculares que se asemejan a flores.

Esas raras formaciones, que también se desarrollan sobre otros soportes, se originan cuando el agua que atraviesa un medio poroso (sea un tallo seco, el suelo o una roca) se congela en una superficie más fría; el líquido fluye, se congela, se incorpora al hielo ya existente y crea ribetes alargados.

Si bien se conocen desde hace tiempo, las flores de hielo todavía siguen planteando interrogantes.



GRUESAS Y ESBELTAS. Son pocos los que pueden disfrutar del destello de la luz de la madrugada sobre las flores de hielo, ya que las oportunidades para observar estas formas de manera óptima al amanecer escasean. Pueden presentar un aspecto estructurado y robusto (*arriba*) o adoptar la apariencia de una gasa (*derecha*). Un rasgo habitual en la mayoría de estas figuras son las estriaciones a lo largo de los ribetes de hielo, que aparecen tal vez porque el hielo se forma a partir de múltiples vasos conductores paralelos en el interior del tallo. Dichos radios del xilema se extienden desde la zona central del tallo hacia la periferia, y quizás explican la disposición perpendicular de las flores de hielo respecto al tallo.



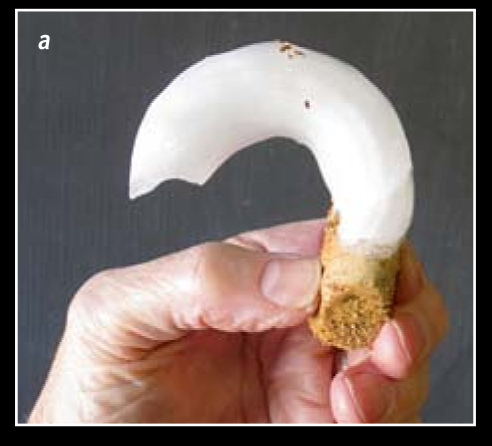
HIELO VITAL. Si bien la mayoría de las flores de hielo brotan de tallos secos o muertos, al inicio de los meses fríos las condiciones pueden favorecer la formación de flores de hielo en plantas vivas. En una mañana calmada de finales de octubre observé este rizo de cuatro centímetros de longitud en *Verbesina virginica*. Las temperaturas solo descendían por debajo de los cero grados en escasas superficies expuestas a cielo abierto. Tan solo dos tallos cortados, como el de la imagen, habían generado hielo; las plantas con hojas impedían que los tallos se congelaran. El reducido grupo de expertos en flores de hielo debate sobre si tales estructuras se originan a partir de la savia presente en los tallos o de agua adicional que asciende desde el suelo. Queda claro que, cuando se forman a partir de tallos muertos, el agua sube desde la superficie por capilaridad, un fenómeno que consiste en la ascensión de un líquido por efecto de la tensión superficial. Este hecho indica que la naturaleza del proceso es más física que biológica. Sin embargo, los investigadores no han analizado todavía si las propiedades químicas del hielo formado en los segmentos superiores de los tallos verdes a comienzos de otoño difieren de las del hielo originado unos meses más tarde en las proximidades del suelo.

FORMAS ACICULARES Y CILÍNDRICAS

Además de flores de hielo, he observado diminutas agujas y barras de hielo. Algunas publicaciones científicas acerca del hielo acicular, que se forma en la superficie del suelo y levanta finas capas de tierra, datan de mediados del siglo XIX. De nuevo aquí entra en juego la segregación del hielo. Según este fenómeno, los poros del medio subyacente deben presentar un tamaño lo suficientemente grande para que el agua ascienda por ellos y alimente el crecimiento del hielo desde abajo; aunque lo bastante pequeño para que la capilaridad

CORTESÍA DE SUSAN WELLS ROLLINSON





pueda vencer la gravedad y haga ascender el agua hacia la superficie (*centro*). Un estudio realizado en 1981 por Vernon Meentemeyer, de la Universidad de Georgia, y Jeffrey Zippin, del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, demostró que el suelo debe contener una cantidad elevada de arcilla y limo, de modo que adquiera una porosidad apropiada para generar agujas. En la imagen inferior se aprecia hielo acicular formado debajo de un tapiz de musgo en Virginia. Las agujas parecen haber crecido a lo largo de dos días y muestran un límite visible que separa la formación de hielo correspondiente a cada noche.



Sobre los guijarros pueden crecer otras formas: las barras de hielo. Estas alcanzan varios centímetros de longitud y, en ocasiones, incorporan otros guijarros más pequeños cuando se extienden. Algunos entusiastas del hielo me enviaron fotografías de estructuras que habían crecido sobre pequeñas rocas y posteriormente me hicieron llegar guijarros representativos. Los coloqué sobre una porción de suelo descubierto que había producido anteriormente hielo acicular. Enseguida se formó una cubierta de hielo sobre una de las rocas. Al día siguiente se fundió parcialmente. Durante la noche siguiente se originó hielo nuevo que empujó al antiguo, lo cual demostraba que estas formaciones responden a la alternancia diaria de etapas de crecimiento e interrupción.

Se trata de rocas sedimentarias, entre ellas algunos cherts, de composición silícea. Algunos fragmentos de ladrillo y cerámica también pueden dar lugar a cubiertas de hielo. Los guijarros que originan estructuras notables deben presentar porosidad y permeabilidad suficientes. He realizado experimentos para medir la cantidad de agua que absorben por capilaridad cuando se disponen sobre una esponja durante quince segundos. De acuerdo con mis observaciones, si el guijarro aumenta de peso durante ese tiempo, tal vez produzca hielo. Existen escasas rocas que exhiban tal capacidad de absorción.

Basándome en esos resultados, mi siguiente paso consistió en tratar de crear hielo sobre guijarros en un congelador haciendo uso de un dispositivo experimental que cualquiera puede recrear en su casa. Utilicé una pequeña nevera de pícnic con una luz regulable como fuente de calor en su base, cubierta por una lámina de aluminio para dispersar el calor. Sobre la bombilla coloqué un contenedor de plástico con arena húmeda, rodeado de material aislante, e introduje guijarros húmedos en la arena. Regulé la bombilla para ajustar las temperaturas, de modo que la parte superior de la arena no se congelara pero las rocas que sobresalían tuvieran la posibilidad de formar hielo en el aire helado.

Si consigo recrear las condiciones idóneas, el hielo crece en los laterales o en la parte superior de las rocas siempre y cuando haya humedad disponible (*b y c, antes y después de la congelación*). En ocasiones, el aspecto de las barras puede ser espectacular (*a*). El hielo puede crecer desde los laterales de las rocas e incluso formar un collar o estructura tubular si el plano de congelación (el área donde las temperaturas son óptimas para la agregación del hielo) se sitúa por debajo de la parte superior del guijarro. Al reemplazar la arena por suelo pesado con un alto contenido en arcilla, la misma configuración genera hielo acicular que crece desde el suelo y levanta los guijarros.







ANCHAS Y ALARGADAS. Las flores de hielo que se generan sobre la misma especie de planta (*en la imagen, género* Verbesina) pueden cobrar diferentes formas, tanto achatadas a nivel del suelo (*arriba*) como alargadas (*derecha*). Algunas de las variaciones dependen de la época del año. En algunos de los experimentos que realicé con plantas que cultivé yo mismo, observé que, al inicio de la época fría, el hielo se extendía en ocasiones a lo largo del tallo hasta alcanzar una altura entre veinte y treinta centímetros desde su base, aunque en esos casos no era muy voluminoso. Más avanzado el año, conforme las plantas se secaban, el hielo crecía únicamente cerca del suelo. He advertido la formación de flores de hielo en veinte ocasiones en las mismas plantas durante el mismo otoño e invierno.



EN CONDUCTOS

Algunos observadores curiosos de todo el mundo me han enviado fotografías de espectaculares espirales y cintas de hielo que han sido extrudidas de forma natural a través de tubos metálicos en diferentes localidades (*derecha y abajo a la izquierda*). Con el fin de dar una explicación a tales formas, traté de reproducir el proceso y generar mis propias espirales de hielo, y desarrollé un método que otros podrán seguir.

El hielo ocupa alrededor de un nueve por ciento más de volumen que el agua, de modo que cuando se congela se produce una expansión. En mi primer intento de reproducir deliberadamente este fenómeno, utilicé tubos de plástico que tenía a mi alcance, pero pronto se hicieron pedazos. Sin embargo, los tubos de hierro negro pueden soportar a veces la presión.

Mis experimentos demostraron que uno de los extremos del tubo debe aplanarse, o bien taparse y después perforar un pequeño orificio o rendija para hacer que el hielo adopte formas dinámicas al brotar. El método más efectivo que he desarrollado consiste en mantener cerrado momentáneamente el orificio y orientarlo boca abajo, a continuación rellenar ese extremo con un poco de agua y dejar que se congele y se forme un tapón de hielo. Después, se rellena el resto del tubo con agua fría (no superenfriada, pues de lo contrario se congelaría al ponerse en contacto con el hielo) y se tapa el otro extremo. Entonces se vuelve a enderezar (de modo que la rendija y el tapón de hielo queden en la parte superior), se saca al exterior y se deja expuesto a una noche helada. Con suerte, la expansión del agua fría contenida en el tubo forzará la salida del tapón de hielo a través de la rendija y dará lugar a rizos alargados (*abajo a la derecha*).

Estos experimentos demuestran que las cintas de hielo que se forman sobre conductos y vallas se extienden a lo largo de dos o tres días. Durante la primera noche en que las temperaturas descienden por debajo de los cero grados Celsius, el agua del tubo se congela. Al día siguiente, parte del hielo se funde mientras el restante flota y forma un tapón. Cuando las temperaturas vuelven a descender durante la noche siguiente, el agua se enfría y se expande, de modo que empuja el tapón de hielo y fuerza su salida al exterior por los orificios que haya disponibles. Me pregunto cuántas extrusiones espectaculares de hielo habrán pasado desapercibidas por haber brotado en lugares remotos.



CORTESÍA DE SHERYL TERRIS



CORTESÍA DE RAUL BAZ





HEBRAS SUELTAS. **Quizás el hielo filamentoso presenta un aspecto todavía más extraordinario que las flores de hielo. Se trata de un conjunto de hilos, de hasta diez centímetros de longitud, que se ondulan alrededor de fragmentos de madera muerta desprovista de corteza. El geofísico Alfred Wegener, más conocido por sus trabajos sobre la teoría de la deriva continental, investigó en profundidad el hielo filamentoso hace un siglo. En tiempo reciente, el botánico Gerhart Wagner y sus colaboradores de la Universidad de Berna han realizado estudios que demuestran que esta forma de hielo guarda relación con la presencia de hongos. El equipo descubrió que los gases residuales liberados por estos microorganismos al descomponer la madera generaban una presión que expulsaba el agua a través de los estrechos canales de la madera hasta la superficie, donde la materia orgánica contenida en el agua agilizaba su congelación. El hielo filamentoso se observa con frecuencia en el oeste de Europa y en la región del noroeste del Pacífico en Norteamérica, y solo se conoce una observación en Nueva Escocia.**

Viene de la página 54

su vez reposaba sobre un volumen de agua superenfriada. (Un líquido superenfriado es aquel cuya temperatura se encuentra por debajo de 0 ºC pero cuya solidificación solo es posible en presencia de algún tipo de imperfección, o nucleador, como una mota de polvo o un cristal de hielo, que induzca el proceso.) El reducido diámetro de los poros del filtro impedía el paso del hielo a través de ellos, pero no así el del agua líquida. A medida que esta fluía hacia la superficie, el agua se congelaba en la base del hielo, se incorporaba a este y lo empujaba hacia arriba. Al congelarse, se liberaba el calor latente de cristalización, que permitía que la temperatura del agua se mantuviera por debajo del punto de fusión y, en consecuencia, el ciclo pudiera repetirse siempre y cuando existiera un aporte de agua.

En el caso de las flores de hielo se dan unas condiciones similares; sobre todo durante la noche, cuando la temperatura del aire desciende por debajo de cero grados pero la humedad del suelo no llega a congelarse. Aun así, en alguna ocasión he observado el crecimiento incipiente de hielo en tallos de plantas al mediodía, cuando penetra aire frío en la zona. Los procesos se interrumpen una vez que el suelo se ha congelado hasta una determinada profundidad, pero pueden reanudarse si se funde. En latitudes medias, las condiciones adecuadas para la formación de flores de hielo pueden darse en cualquier momento entre mediados de otoño y comienzos de primavera.

No deja de sorprenderme gratamente que un elemento tan común como el hielo pueda adquirir unas morfologías tan poco habituales que no se entienden en su totalidad. Cada día, el agua adopta un gran número de formas extravagantes. Ahora podemos ir en busca de nuevos misterios cuando bajan las temperaturas.

PARA SABER MÁS

Some observations on needle ice. D. M. Lawler en *Weather*, vol. 44, n.º 10, págs. 406-409, 1989.

Haareis: Ein seltenes biophysikalisches phänomen im winter. Gerhart Wagner y Christian Mätzler en *Naturwissenschaftliche Rundschau*, vol. 62, n.º 3, págs. 117-123, 2009.

En su página web, el autor describe diversas formaciones de hielo e incluye referencias bibliográficas sobre el tema. **http://my.ilstu. edu/~jrcarter/ice/**

EN NUESTRO ARCHIVO

Cristales de hielo en una célula convectiva. M. Boada Ferrer en *IyC*, noviembre de 2005.

Beatriz H. Juárez es profesora en la Universidad Autónoma de Madrid e investigadora del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Nanociencia.

Luis M. Liz Marzán es el director científico y profesor Ikerbasque del Centro de Investigación Cooperativa en Biomateriales CIC biomaGUNE. En noviembre fue reconocido con la medalla de la Real Sociedad Española de Química por su trayectoria investigadora, centrada en la química física y la ciencia de materiales.



QUÍMICA

Nanomateriales a la carta

Un fino control del tamaño y la forma de las nanopartículas permite obtener materiales con nuevas propiedades ópticas y electrónicas

Beatriz Hernández Juárez y Luis M. Liz Marzán

Ya en la Grecia clásica se sospechaba que la materia estaba compuesta por átomos como unidad indivisible. Pero solo después de las investigaciones que John Dalton realizó en el siglo xix se descubrió que estos reaccionaban entre sí en proporciones definidas, formando moléculas.

Hoy sabemos, además, que unos pocos átomos pueden agruparse y formar pequeños racimos o agregados (*clusters*). Se han identificado agregados de oro estables que contienen solo 13 o 55 átomos, por ejemplo. Sin embargo, la distribución espacial de estos no es la misma que adoptarían si formaran parte de un lingote (en el que millones de átomos de oro se empaquetan de forma muy ordenada); pueden incluso presentar una estructura amorfa. Lejos de ser un detalle irrelevante, la posición de los átomos tiene un impacto directo sobre las propiedades químicas y físicas de las partículas resultantes, sobre todo si estas son de tamaño muy reducido.

Entre los casos extremos anteriores (los agregados, de pocos átomos, y el lingote, de muchos millones de átomos), existe un universo de dimensiones intermedias en el que los átomos se ordenan de la misma forma que en los cristales macroscópicos pero las propiedades electrónicas y ópticas varían con el tamaño de las partículas. Nos referimos al mundo de los materiales nanométricos, o nanomateriales, objetos con dimensiones externas o estructura interna pertenecientes a la nanoescala, es decir, entre 1 y 100 nanómetros.

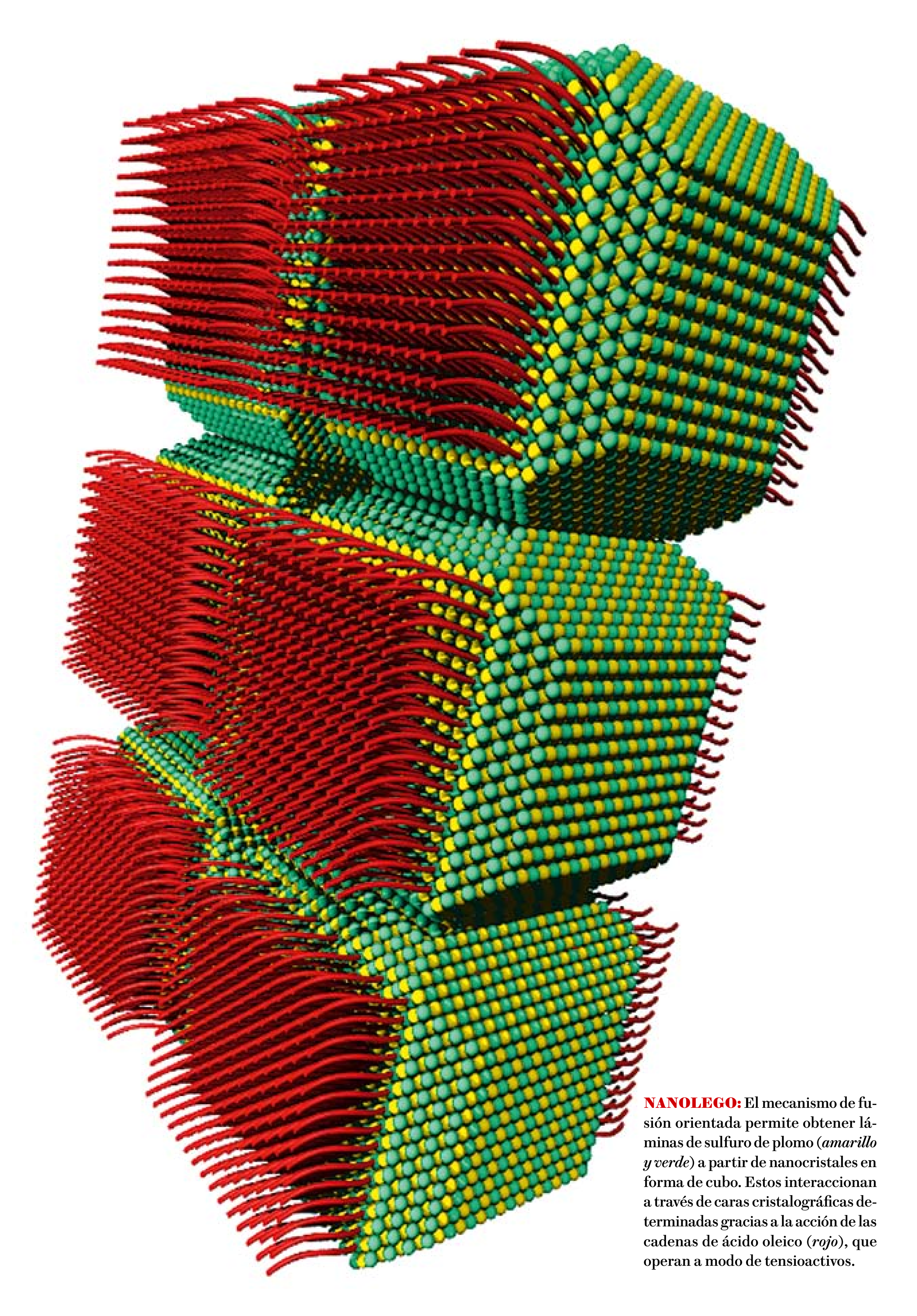
Los nanomateriales se caracterizan por presentar una elevada proporción de átomos en la superficie. Ello entraña consecuencias muy importantes para sus propiedades químicas y físicas. Pensemos en el punto de fusión. Si intentamos fundir un lingote de oro de un kilo, o incluso de un gramo, necesitaremos calentarlo hasta algo más de 1000 ºC; en cambio, para fundir

EN SÍNTESIS

La nanotecnología se basa en el control de las propiedades de los materiales mediante variaciones minúsculas de su tamaño, en la escala de la millonésima de milímetro.

Los nuevos métodos de síntesis de nanopartículas, basados en la química coloidal, ofrecen una precisión en el control del tamaño y la morfología inalcanzables con los métodos tradicionales de fabricación.

La posibilidad de modular a voluntad las propiedades ópticas y electrónicas de las nanoestructuras está cosechando numerosas aplicaciones tecnológicas y biomédicas.



CORTESÍA DE CHRISTIAN KLINKE

NANOLEGO: El mecanismo de fusión orientada permite obtener láminas de sulfuro de plomo (*amarillo y verde*) a partir de nanocristales en forma de cubo. Estos interaccionan a través de caras cristalográficas determinadas gracias a la acción de las cadenas de ácido oleico (*rojo*), que operan a modo de tensioactivos.

la misma cantidad del precioso metal, pero en forma de nanopartículas de unos pocos nanómetros, bastarán 350 ºC. Ello se debe a que los átomos que residen en la superficie de un sólido (sea un lingote o una nanopartícula) se enlazan más débilmente con los átomos vecinos que con los del interior, por lo que son más vulnerables al ambiente exterior. Como consecuencia, la proporción de átomos que se encuentran en la superficie (que aumenta al disminuir el tamaño de las partículas) determina en gran medida el punto de fusión del material. Esta notable variación de las propiedades en función del tamaño ha despertado un gran interés científico y tecnológico que ha acabado por conformar la ya archiconocida nanotecnología.

LA IMPORTANCIA DEL TAMAÑO Y LA FORMA

El tamaño y la forma de los nanocristales afectan también a las propiedades ópticas del metal, es decir, la manera en la que la luz interacciona con él. Siguiendo con el ejemplo del oro, dado que este posee una gran cantidad de electrones libres (los de la banda de conducción, que hacen que sea un buen conductor de la electricidad), el campo eléctrico de la luz puede provocar la oscilación colectiva de los mismos. Ello da lugar a resonancias plasmónicas, un tipo de ondas de carga eléctrica superficiales. Cuando las partículas metálicas son nanométricas, los electrones se hallan confinados en espacios tan reducidos que dichas oscilaciones electrónicas se denominan plasmones superficiales localizados. Debido a las limitaciones de espacio, poseen características singulares: pueden absorber o reflejar selectivamente luz de un determinado color; pueden enfocar y guiar la luz en escalas inferiores a su longitud de onda, y amplificar el campo eléctrico en la superficie de las nanopartículas.



EXCITACIÓN PLASMÓNICA: Los electrones libres de las nanopartículas metálicas se acoplan con la luz, generando unas ondas denominadas plasmones superficiales localizados. Estas oscilaciones colectivas confieren propiedades ópticas singulares, que dependen de la forma. El fenómeno es visible a escala macroscópica: la fotografía muestra varias dispersiones de nanopartículas, cuyo color varía según la geometría de las mismas: esferas (*rojo*), varillas (*marrón*), jaulas (*verde*), triángulos (*azul*) y decaedros (*violeta*).

Los fenómenos anteriores dependen de la geometría de las partículas metálicas: cuando son esféricas, la frecuencia y simetría del modo de oscilación de los electrones es independiente de la dirección de la luz incidente; en las cilíndricas o alargadas, cuyas resonancias sí dependen de la orientación de la luz, el campo se concentra en los extremos; en las triangulares, en los vértices.

En el mundo macroscópico, la diferente interacción de la luz con las nanopartículas, según el tamaño y forma de estas, se refleja en el color de las dispersiones en un líquido. La excitación plasmónica también es responsable de los distintos colores que presenta la copa de Licurgo, un vaso romano del siglo IV d.C. con nanopartículas de plata y oro incrustadas en una matriz vítrea: de color verdoso en condiciones normales (cuando la luz es reflejada), el vaso se torna rojo si se coloca una fuente de luz en su interior (luz transmitida).

Si bien la ciencia de los nanomateriales es relativamente nueva, el estudio de los cambios que sufren las propiedades ópticas del oro, la plata y otros metales cuando estos se dividen en partículas de tamaño reducido comenzó mucho antes de que surgiese la nanotecnología como tal. Probablemente el primer trabajo científico moderno sobre esta cuestión sea el famoso tratado *Relaciones experimentales del oro (y otros metales) con la luz*, publicado por Michael Faraday en 1857 —una obra de lectura obligada para los interesados en este campo e incluso para cualquier químico o físico que quiera disfrutar con la descripción de fenómenos con carácter visionario—. Incluso en épocas muy anteriores a Faraday, dichos fenómenos ópticos eran ya conocidos y habían sido explotados con la finalidad de proporcionar coloración en las vidrieras de iglesias y catedrales, y otros elementos decorativos [*véase* «Nanotecnia medieval», por Marius Vendrell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2009].

Otro ejemplo de la interacción entre la luz y las nanopartículas lo encontramos en los nanocristales de materiales semiconductores, o puntos cuánticos. En los semiconductores, las bandas de valencia y de conducción se hallan separadas por una barrera de energía. Esta banda «prohibida» suele venir definida por la composición química de estos. Sin embargo, en la escala nanométrica dicha separación está determinada, fundamentalmente, por el tamaño del cristal: es mayor para los nanocristales pequeños. La incidencia de luz en estos nanocristales provoca que algunos electrones de la banda de valencia se transfieran a la banda de conducción, dejando huecos (portadores de carga positiva) en la banda de partida. El tamaño reducido del cristal confina esos electrones y sus correspondientes huecos, que tienden a unirse (recombinarse) emitiendo luz ligeramente menos energética que la que provocó la excitación y cuya longitud de onda (color) aumenta con el tamaño del cristal. Además del tamaño, también las características de la superficie determinan las propiedades ópticas de los puntos cuánticos. Incluso la adición de unos pocos átomos puede cambiar drásticamente la emisión de luz.

La extrema variabilidad de las propiedades de las nanopartículas ha obligado a químicos y físicos a desarrollar técnicas de síntesis de gran precisión. Gracias a los avances de los últimos treinta años, contamos hoy con métodos que permiten un control exquisito del tamaño y la morfología de las nanopartículas, lo que permite optimizar sus propiedades para cada aplicación. Nos centraremos aquí en los procesos que van «de



RECOMBINACIÓN DE ELECTRONES Y HUECOS: Cuando la luz incide en nanocristales de un semiconductor (o puntos cuánticos) se produce una reorganización de los electrones que termina en la emisión de radiación ligeramente menos energética y cuya longitud de onda (color) aumenta con el tamaño del cristal. En la fotografía se muestran varios recipientes, cada uno con una dispersión de nanocristales de seleniuro de cadmio (CdSe) cuyo tamaño varía entre los 2 y los 6 nanómetros; cuando se iluminan con una lámpara ultravioleta, cada uno emite luz de energía distinta (fluorescencia).

CORTESÍA DE LOS AUTORES

abajo arriba», es decir, que no se basan en tallar el material macroscópico hasta obtener nanopartículas del tamaño deseado, sino en juntar átomos y moléculas para construir partículas de dimensiones y forma determinadas.

QUÍMICA COLOIDAL

En general, los métodos de síntesis química en disolución son fáciles de implementar y permiten obtener rendimientos elevados con un coste bajo. Se consideran, por tanto, los más viables a medio y largo plazo. Sin embargo, cuando se trata de obtener nanopartículas con determinadas características geométricas y químicas, las cosas no son tan sencillas. Dado que las propiedades de estas son muy sensibles a pequeñas variaciones morfológicas, idealmente todas deberían ser idénticas, es decir, deberían crecer de la misma manera, a la misma velocidad y detener su crecimiento al mismo tiempo. Teniendo en cuenta que en una síntesis química suelen producirse algunos billones de partículas por centímetro cúbico, lograr tal uniformidad parece una tarea prácticamente imposible. Además, dado que las nanopartículas presentan una superficie intrínsecamente inestable, tienden a unirse entre sí formando agregados y, por tanto, alterando sus propiedades.

Para evitar dichos inconvenientes, se recurre a la química coloidal. Un coloide, o dispersión coloidal, corresponde a un sistema formado por dos o más fases, de forma que la fase minoritaria (partículas) se encuentra dispersa en una fase continua (disolvente). Las partículas coloidales presentan tamaños comprendidos entre 1 y 1000 nanómetros, es decir, entre nanopartículas y micropartículas. (No cabe en este artículo una discusión completa sobre las propiedades de los coloides, pero debemos tener en cuenta que muchos de los conceptos utilizados en la síntesis de nanopartículas se basan en conocimientos de la química coloidal.)

Para empezar, a raíz de estudios clásicos sobre los mecanismos de formación de coloides realizados a mediados del siglo xx, sabemos que para obtener dispersiones de partículas con tamaño uniforme (baja polidispersidad), deben favorecerse dos procesos: una rápida formación inicial de núcleos de crecimiento mediante la reacción de ciertas especies precursoras (nucleación) y una segunda etapa de crecimiento, más prolongada, en la que se evite la formación de nuevos núcleos. De esta forma, el ritmo de crecimiento del cristal se halla controlado por la velocidad con la que los reactivos reaccionan sobre la superficie del mismo, la velocidad con que difunden por la disolución hacia la superficie o por una combinación de ambos procesos. Este concepto se ha aplicado con éxito en la síntesis de puntos cuánticos coloidales (nanopartículas semiconductoras). Los más conocidos son los calcogenuros como el seleniuro de cadmio (CdSe), telururo de cadmio (CdTe), telururo de cinc (ZnTe) o sulfuro de plomo (PbS), entre otros.

Uno de los métodos de síntesis más extendidos es la inyección en caliente. Este separa las etapas de nucleación y crecimiento mediante la inyección de precursores en un disolvente a temperaturas de entre 250 y 320 ºC. Da lugar a nanocristales muy homogéneos (de tamaño muy similar) y de alta calidad cristalina. En el último decenio, este método se ha modificado para generar estructuras cada vez más complejas; permite sintonizar las propiedades ópticas, electrónicas y catalíticas prácticamente a voluntad.

Cuando lo que se quiere sintetizar son coloides de oro y plata, se recurre a la reducción de sales metálicas; para ello suelen emplearse agentes químicos reductores, luz o calor. Las condiciones de estas reacciones pueden variar bastante; pueden llevarse a cabo a temperatura ambiente y en agua si se utilizan reductores fuertes como el borohidruro de sodio o la hidrazina.

ESCULPIR PUNTOS CUÁNTICOS

Ya hemos visto que las variaciones nanométricas en el tamaño de los nanocristales semiconductores generan cambios drásticos en sus propiedades ópticas. En el caso típico del CdSe, para aumentar 1 nanómetro el diámetro del nanocristal debemos depositar menos de 3 capas atómicas, por lo que el control sintético debe realizarse necesariamente con la mayor precisión posible.

Además del tamaño, debe controlarse también la forma. Ello resulta esencial para cumplir los requisitos necesarios en determinadas aplicaciones: los nanocristales alargados, por ejemplo,

favorecen el contacto y el transporte de carga entre electrodos (interesante para aplicaciones optoelectrónicas) y aportan una mayor absorción de luz (propiedad útil en aplicaciones relacionadas con la detección por fluorescencia).

La inyección en caliente permite controlar el tamaño, la forma, la calidad cristalina y la uniformidad de las nanopartículas. Pero al emplear temperaturas elevadas, de alrededor de 300 ºC (lo que aumenta las velocidades de las reacciones químicas), estamos obligados a utilizar moléculas que frenen la velocidad de crecimiento. Aun así, los nanocristales se sintetizan en cortos períodos de tiempo (minutos) y el crecimiento puede detenerse antes de llegar al estado final, simplemente enfriando bruscamente la disolución.

En todos estos métodos resulta imprescindible el uso de tensioactivos, moléculas que contienen en su estructura una parte polar y otra apolar. El control del tamaño y la forma de las nanopartículas no sería posible sin estas sustancias. Ello se debe a que una molécula de tensioactivo puede unirse con mayor o menor fuerza a las distintas caras del cristal, lo que permite controlar de forma selectiva el crecimiento de unas caras respecto de otras y, por tanto, la forma resultante del nanocristal. Una vez terminada la reacción, estas moléculas quedan ancladas en la superficie del cristal, por lo que pasan a denominarse ligandos. Un nanocristal semiconductor, o punto cuántico coloidal, consta, pues, de un núcleo inorgánico rodeado de una corona de ligandos orgánicos.

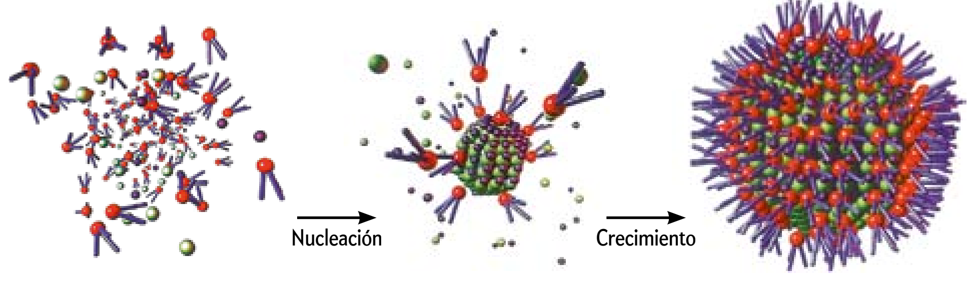
Asimismo, suele ser necesario optimizar la estabilidad superficial y el rendimiento de emisión (capacidad de convertir luz absorbida en fluorescencia) de los puntos cuánticos. Una de las estrategias que suelen emplearse con este propósito consiste en rodearlos con unas pocas capas atómicas de otro material semiconductor. En función de la naturaleza de cada material, se obtendrá una configuración electrónica de tipo I o de tipo II. En la de tipo I, las energías relativas se disponen en forma de sándwich, donde las bandas de valencia y de conducción del material de recubrimiento quedan por debajo y por encima, respectivamente, de las bandas de valencia y conducción del material del núcleo; ello causa que, tras una excitación óptica, los electrones y los huecos queden confinados exclusivamente en el núcleo, haciendo más difíciles los procesos de oxidación inducidos por la luz incidente (fotooxidación) y aumentando la eficiencia del nanocristal como emisor.

En la configuración de tipo II, en cambio, las bandas de energía del núcleo y del recubrimiento se disponen de manera escalonada, de modo que el electrón y el hueco quedan atrapados en el núcleo y la capa exterior, respectivamente. Ello se puede explotar, por ejemplo, en dispositivos fotovoltaicos, que pueden hacer uso de los electrones para generar corriente, simplemente

DE ABAJO ARRIBA

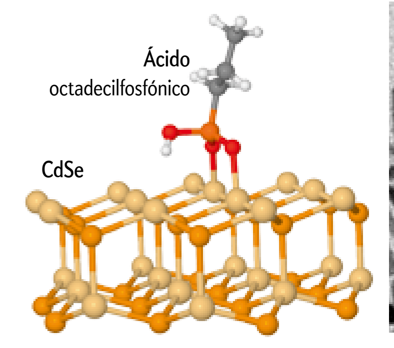
Construcción de nanocristales coloidales

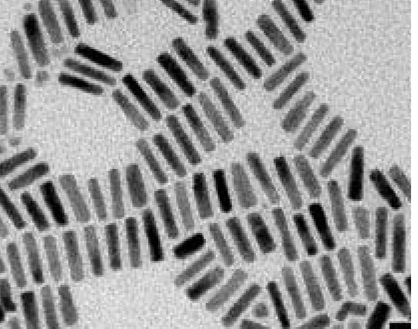
Dado que las propiedades químicas y ópticas de las nanopartículas dependen sobremanera de su tamaño y morfología, para sintetizarlas se requiere un método de crecimiento homogéneo y controlable, que permita obtenerlas con un tamaño uniforme. Los procesos que mejor se adaptan a estas necesidades pertenecen al ámbito de la química coloidal, que trabaja con mezclas entre una fase dispersa (partículas) y una fase continua (disolvente).





La formación de nanocristales coloidales con un tamaño uniforme se divide en dos etapas principales: la nucleación y el crecimiento. Para controlar la forma del cristal se utilizan tensioactivos, moléculas que, al poseer una parte polar y otra apolar (anfipáticas), se unen con mayor o menor fuerza a cada cara del cristal en crecimiento. Las partículas resultantes constan de un núcleo inorgánico rodeado por una corona de ligandos orgánicos (tensioactivos). El esquema ilustra la formación de nanocristales esféricos de seleniuro de cadmio (CdSe) mediante tensioactivos.





La microscopía electrónica (*derecha*) muestra nanopartículas alargadas (barras o varillas) de CdSe obtenidas mediante ácido octadecilfosfónico (*izquierda*, representado solo con una parte de la cadena). Esta molécula se une mediante uno, dos o tres oxígenos (*rojo*) a determinadas caras del cristal de CdSe, variando así la fuerza de la unión y favoreciendo el crecimiento en una de las direcciones.

CORTESÍA DE LOS AUTORES (*simulación estructural y microscopía electrónica*)

Tipo I

Tipo II

Energía

e⁻

h⁺

Núcleo

Recubrimiento

EFICIENCIA EMISORA: **Para mejorar su rendimiento de emisión, los puntos cuánticos suelen recubrirse con otro material semiconductor. Ello resulta en dos tipos de configuraciones electrónicas. En la de tipo I, las bandas de valencia y de conducción del material de recubrimiento (*verde*) forman una suerte de sándwich con las del núcleo (*azul*); ello hace que, tras una excitación óptica, los electrones y los huecos queden confinados exclusivamente en el núcleo, lo que dificulta la oxidación inducida por la luz incidente y aumenta la eficiencia emisora del nanocristal. En la configuración de tipo II, en cambio, las bandas del recubrimiento (*rojo*) quedan escalonadas con las del núcleo; el electrón y el hueco quedan entonces atrapados en el núcleo y la capa exterior, respectivamente, lo cual puede explotarse en dispositivos fotovoltaicos.**

por iluminación del material. Asimismo, estas partículas pueden combinarse con un metal y utilizarse para generar hidrógeno a partir de la rotura de una molécula de agua.

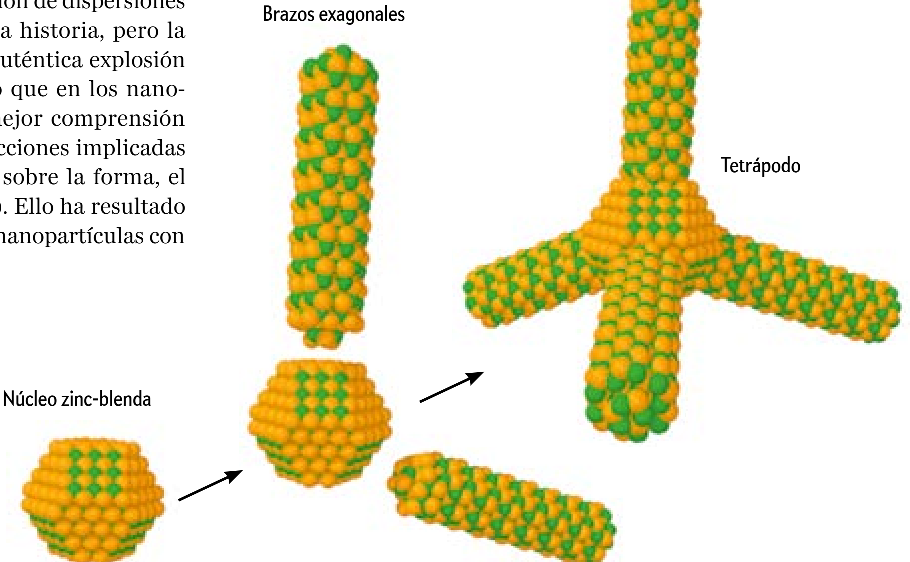
El diseño de puntos cuánticos con estructuras complejas no se detiene en las esferas concéntricas. Los métodos de síntesis actuales permiten obtener otras figuras, entre las que destacan aquellas compuestas de varios brazos (tetrápodos o estructuras estrelladas en general). El crecimiento de dichos nanocristales ramificados suele basarse en el polimorfismo. Un material polimorfo es aquel que, compartiendo la misma composición elemental, puede existir en más de una estructura cristalina. Un ejemplo corresponde a los tetrápodos de telururo de cadmio (CdTe); en este caso, la diferencia de energía que debemos aportar al sistema para generar un nanocristal en estructura cristalina cúbica o hexagonal es notable y puede ser controlada mediante cambios de temperatura. En la práctica, es necesario realizar la nucleación a una temperatura que favorezca la fase cúbica (entre 5 y 10 ºC menos que la fase de crecimiento), lo que genera una estructura combinada donde una nanopartícula de CdTe cúbica actúa de punto de anclaje para el posterior crecimiento de CdTe hexagonal en forma de barra a mayor temperatura. Este mecanismo de crecimiento se ve favorecido por la similitud entre las caras cristalográficas que participan como puntos de anclaje entre los cuatro brazos hexagonales y el núcleo, así como por la presencia de tensioactivos, que favorecen el crecimiento en la dirección cristalina que conduce a la formación de un cristal en forma de barra de fase hexagonal.

MOLDEAR NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

El uso de la química coloidal para la preparación de dispersiones de nanopartículas metálicas tiene una larga historia, pero la investigación en este campo ha vivido una auténtica explosión durante los últimos veinte años. Lo mismo que en los nanocristales semiconductores, gracias a una mejor comprensión del papel de distintos parámetros de las reacciones implicadas se ha conseguido un alto grado de control sobre la forma, el tamaño y la monodispersidad (uniformidad). Ello ha resultado esencial para relacionar la morfología de las nanopartículas con su respuesta óptica y para el diseño de dispositivos basados en el ensamblaje de nanopartículas.

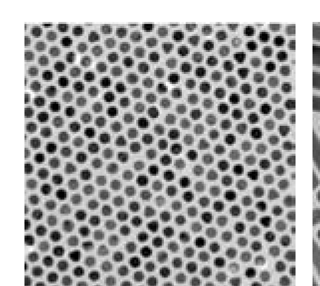
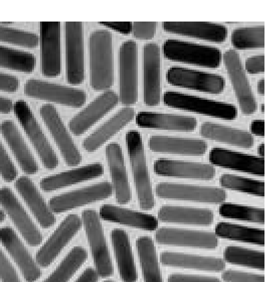
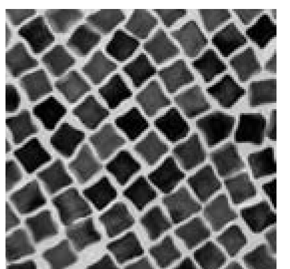
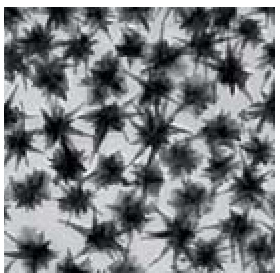
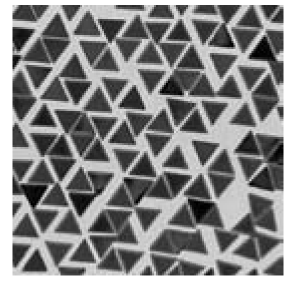
Como ya hemos mencionado, la síntesis coloidal de nanometales de alta calidad suele basarse en la separación de los procesos de nucleación y crecimiento cristalino, de ahí que estos métodos se denominen de «crecimiento sobre semillas». Se basan en la reducción autocatalítica de iones metálicos sobre las partículas semilla (habitualmente muy pequeñas, de entre 2 y 3 nanómetros), que actúan simultáneamente a modo de catalizadores y puntos de nucleación. Por tanto, la concentración final de partículas viene determinada por la cantidad inicial de semillas, y el tamaño se controla mediante la cantidad de iones metálicos que se introducen para el crecimiento.

Sin embargo, en ciertas condiciones el crecimiento no es uniforme. Algunas caras cristalinas crecen con mayor velocidad que otras, con lo que se originan anisotropías en los nanocristales resultantes. Ocurre en la síntesis de nanovarillas de oro en agua y en presencia de ciertos tensioactivos. Ello demuestra la complejidad de estos procesos de crecimiento, ya que la morfología de las partículas se ve muy afectada por ligeras variaciones en la concentración de semillas y tensioactivo, la temperatura o la presencia de otros aditivos (en especial las sales de plata y los iones de halógenos como cloro, bromo o yodo). Todos estos aditivos alteran la energía de las distintas caras cristalinas y, por tanto, el modo de crecimiento.



NANOPARTÍCULAS ESTRELLADAS: **El polimorfismo, la capacidad de ciertos materiales de formar distintas estructuras cristalinas, se aprovecha para la obtención de nanocristales ramificados como estos tetrápodos, formados a partir de un núcleo en estructura cúbica zinc-blenda con brazos en estructura wurtzita hexagonal.**

CORTESÍA DE CHRISTIAN KLINKE (*nanocristales*)

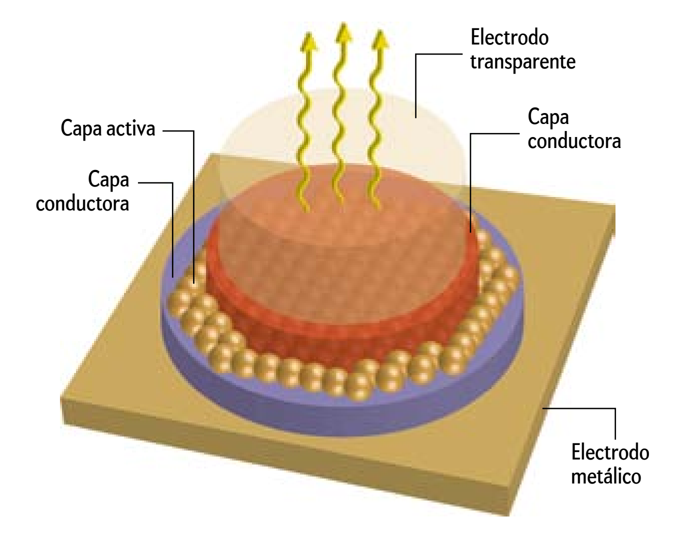






GEOMETRÍA A LA CARTA: A partir de las mismas semillas esféricas de oro, pueden obtenerse nanopartículas de distintas geometrías mediante ligeras variaciones en la concentración de los reactivos, el uso de aditivos u otras condiciones de síntesis (micrografías electrónicas de transmisión).

Obviamente, también la forma y la estructura de las semillas afectan a la geometría final. Pueden obtenerse prismas con sección pentagonal u octagonal en función de que las semillas tengan o no defectos cristalinos. Sin embargo, incluso partiendo de las mismas semillas, si se cambian las concentraciones de los reactivos o se incluyen algunos de los aditivos mencionados, en lugar de partículas alargadas podemos obtener placas triangulares, cubos o estrellas, entre otras morfologías.

El método de crecimiento sobre semillas se ha aplicado también para generar nanopartículas bimetálicas por crecimiento de un metal sobre otro. Habitualmente se hace crecer plata sobre oro, dado que es un proceso más sencillo desde el punto de vista químico (la plata puede oxidarse con mayor facilidad que el oro).

Tanto los cambios morfológicos como la composición de las partículas permiten modular, prácticamente a voluntad, el color de las dispersiones coloidales. Ya hemos visto que ello es posible porque la forma de las partículas determina las oscilaciones electrónicas en el metal (resonancias plasmónicas superficiales localizadas) y, por tanto, la longitud de onda que mejor se acopla con estas. El crecimiento de nanovarillas más alargadas permite desplazar la resonancia hacia el rojo e incluso el infrarrojo; el mismo efecto se produce mediante el crecimiento de puntas afiladas en las nanoestrellas o fabricando triángulos más delgados.



QLED: Esquema de un diodo emisor de luz (LED) basado en puntos cuánticos. La capa activa está formada por nanocristales semiconductores embebidos entre capas conductoras que inyectan electrones y huecos y generan la emisión de luz desde ellos.

Ese control sobre la resonancia plasmónica conlleva consecuencias importantes en numerosas aplicaciones. En el campo biomédico, donde las nanopartículas de oro han sido propuestas como uno de los nanomateriales más prometedores, resulta esencial que las resonancias plasmónicas se produzcan en la zona del infrarrojo cercano, donde los tejidos biológicos absorben menos y, por tanto, permiten el paso de luz. En otras aplicaciones como la detección y el diagnóstico, en cambio, se requiere que el campo eléctrico generado sobre las partículas sea el mayor posible; en este caso, la formación de puntas afiladas constituye una opción muy ventajosa.

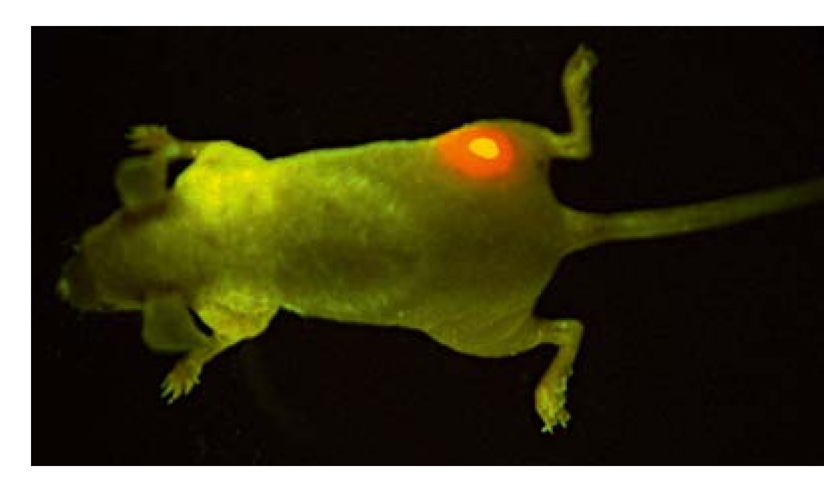
Aparte del uso de tensioactivos, existen muchos otros métodos para la síntesis de nanopartículas metálicas que también permiten controlar su tamaño, forma y respuesta óptica. Merece la pena destacar la reducción en polioles: esta familia de métodos se basa en el uso de disolventes no acuosos con alto punto de ebullición (en torno a 160 ºC) como el etilenglicol y sus derivados poliméricos o la N,N-dimetilformamida; ello permite inducir la reducción a alta temperatura de sales de oro o plata, en presencia de un polímero que actúa como agente estabilizante. Una vez más, variaciones en las concentraciones de los distintos componentes o de la temperatura permiten conducir el crecimiento cristalino hacia distintas morfologías. En estos métodos pueden, además, combinarse varios metales, lo que amplía la variedad de morfologías y propiedades posibles.

Una extensión muy interesante del proceso anterior nos permite transformar las nanopartículas de plata en oro. Nos referimos a la sustitución galvánica. En esta, la adición de una sal de oro a alta temperatura da lugar a la oxidación de la plata y la reducción simultánea del oro (que posee un potencial electroquímico mayor), de forma que se obtienen nanocristales de oro que mantienen la morfología de las partículas de plata originales, pero con un hueco en su interior. La técnica también puede aprovecharse para manipular las resonancias plasmónicas.

APLICACIONES

La principal ventaja de los sistemas descritos, ya sea en forma de puntos cuánticos o de nanopartículas metálicas, radica en su naturaleza coloidal. La dispersión en un medio líquido adecuado facilita, como veremos a continuación, su integración en dispositivos o su interacción con células en un medio líquido biológicamente compatible.

Las aplicaciones más directas de los nanocristales semiconductores guardan relación con sus propiedades ópticas y con la capacidad de sintonizar a voluntad una determinada energía en la zona del visible o del infrarrojo cercano. En particular, la posibilidad de generar estructuras de alta eficiencia de emisión



NANOMARCADORES BIOLÓGICOS: **Ratón al que se han inyectado nanocristales semiconductores unidos a receptores biológicos que se unen selectivamente a células cancerígenas; al iluminarlo con radiación capaz de excitar esos nanocristales, la emisión de luz fluorescente indica la posición del tumor.**

CORTESÍA DE XIAOHU GAO Y SHUMING NIE, FACULTAD DE MEDICINA DE LA UNIVERSIDAD EMORY

y gran estabilidad frente a la fotooxidación se ha usado en el desarrollo de diodos emisores de luz (LED); en estos, una capa de nanocristales semiconductores se intercala entre materiales con capacidad de inyectar electrones (cátodo) y huecos (ánodo), generando así una excitación eléctrica (y en ocasiones también óptica) en los puntos cuánticos, que provoca la emisión de luz.

Dado que la energía de emisión (color) puede seleccionarse modificando el tamaño del nanocristal, la técnica permite disponer de una rica paleta de colores. Ello ha propiciado la fabricación de pantallas de televisión LED con puntos cuánticos; las comercializa SONY y se basan en una técnica desarrollada por QD Vision, empresa cofundada por Vladimir Bulovic y Moungi Bawendi, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En este caso, una fuente de luz azul excita nanocristales, que emiten luz verde o roja según su tamaño. La luz emitida por estos dispositivos ofrece un contraste mejorado. Para la integración de estos nanocristales en dispositivos (fotodetectores, células solares, etcétera), es imprescindible evitar que se generen cargas superficiales que inutilicen la capacidad emisora del punto cuántico. Tanto la calidad del cristal como su química superficial son, pues, aspectos fundamentales para el correcto funcionamiento de estos dispositivos.

Pasemos a las aplicaciones biomédicas. Debido al pequeño tamaño de las nanopartículas (equiparable al de las proteínas o los ácidos nucleicos), los puntos cuánticos pueden acoplarse a moléculas biológicas y, con ellas, llegar al interior de las células. Este fenómeno se demostró en 1998 en dos trabajos paralelos llevados a cabo por los grupos de Paul Alivisatos, en la Universidad de California en Berkeley, y Shuming Nie, en la Universidad de Indiana. El hallazgo abrió nuevas perspectivas en un campo hasta entonces limitado a los colorantes orgánicos.

Asimismo, gracias a los avances en las técnicas de microscopía (de fluorescencia, confocal) y espectroscopía, es posible detectar nanopartículas en el interior de las células e incluso seguir su trayectoria. Así, pueden usarse estos materiales a modo de marcadores biológicos que señalizan procesos en células o seres vivos. Ello puede facilitar el diagnóstico de enfermedades y ayudar a conocer la distribución de moléculas o fármacos en el interior de las células, lo cual permitiría diseñar terapias más específicas y menos agresivas, es decir, que actúen solo en la zona dañada del organismo.

En cuanto a las nanopartículas metálicas, su respuesta frente a la luz visible (resonancia plasmónica) y la capacidad de generar intensos campos electromagnéticos en su superficie ofrecen una amplia gama de aplicaciones. Dado que la luz se acopla de una forma muy especial a estos objetos de tan reducido tamaño, pueden considerarse como antenas ópticas. Se están aplicando al desarrollo de guías de onda plasmónicas, así como de circuitos ópticos que pueden transmitir una enorme cantidad de información a gran velocidad, por lo que podrían competir con los actuales sistemas de telecomunicaciones.

Las propiedades ópticas anteriores se aplican también en nuevas técnicas de detección y biodetección. Entre ellas destaca la espectroscopía de dispersión Raman aumentada por superficies (SERS, por sus siglas en inglés). Esta ha permitido el diseño de nuevos sensores que hacen posible la detección de cantidades ínfimas de moléculas a través de señales muy selectivas, relacionadas con las frecuencias de vibración de enlaces químicos. El mapa de frecuencias viene a ser una huella digital de la molécula, de modo que permite reconocerla de forma inequívoca. Estas señales se amplifican enormemente cuando las moléculas se encuentran sobre la superficie (de ahí el nombre) de nanopartículas metálicas iluminadas. Las medidas de SERS prácticamente no requieren preparación previa de las muestras, por lo que esta técnica presenta aplicaciones muy prometedoras en control ambiental y en biomedicina. La capacidad de detectar cantidades ínfimas de moléculas marcadoras de enfermedades permitiría realizar diagnósticos en las etapas iniciales, facilitando así el tratamiento de las mismas.

En algunos casos, también pueden usarse nanopartículas metálicas como elementos terapéuticos, bien como portadores de medicamentos o bien como elementos que pueden causar la muerte de células tumorales de una forma altamente selectiva y que, por tanto, evite efectos secundarios [*véase* «Nanomedicina contra el cáncer», por James R. Heath, Mark E. Davis y Leroy Hood; Investigación y Ciencia, abril de 2009].

El perfeccionamiento de métodos de síntesis que permitan un alto grado precisión en la fabricación de nanocristales y nanoestructuras se torna, por tanto, indispensable para el desarrollo de un amplio abanico de aplicaciones que la nanotecnología viene prometiendo desde hace algunas décadas.

PARA SABER MÁS

Semiconductor nanocrystal quantum dots: Synthesis, assembly, spectroscopy and applications. Dirigido por Andrey L. Rogach. Springer, Viena, Nueva York, 2008.

Nanopartículas semiconductoras coloidales y aplicaciones. Beatriz H. Juárez en *Anales de Química*, vol. 107, págs. 229-236, 2011.

Nanoplasmónica basada en química coloidal. Andrés Guerrero Martínez, Ramón A. Álvarez Puebla y Luis M. Liz Marzán en *Anales de Química*, vol. 107, págs. 221-228, 2011.

Complex-shaped metal nanoparticles: Bottom-up syntheses and applications. Dirigido por T. K. Sauy y A. L. Rogach. Wiley-VCH, 2012.

Gold. *Nature,* vol. 495, n.º7440 (Outlook), págs. S1-S45, marzo de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Puntos cuánticos. M. A. Reed en *IyC*, marzo de 1993.

Plasmones superficiales. F. García Vidal y Luis Martín Moreno en *IyC*, octubre de 2008.

Nuevos estados marginales. Vincenzo Vitelli y Martin van Hecke en *IyC*, mayo de 2012.



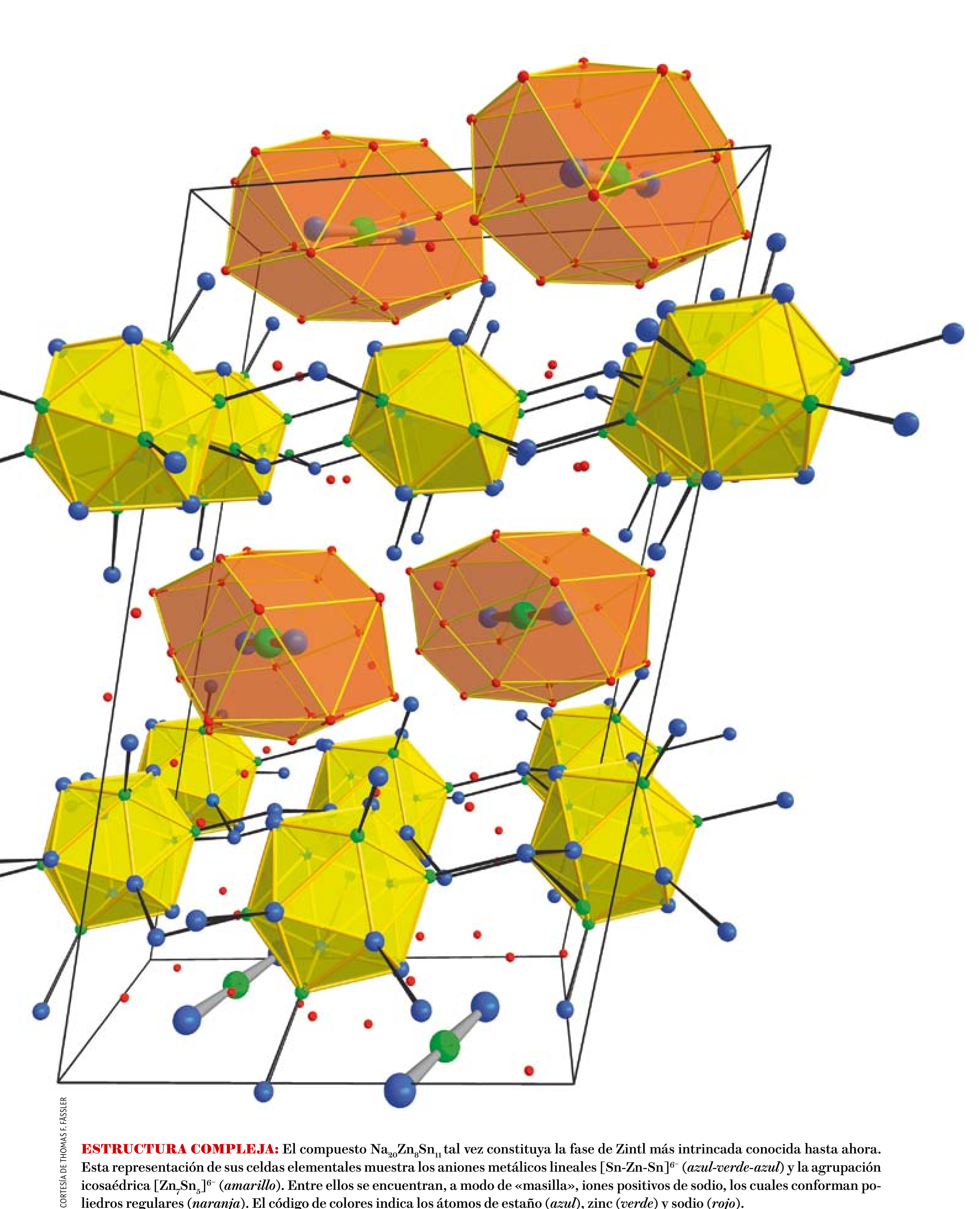
QUÍMICA

FASES DE ZINTL

A medio camino entre las sales y los metales, la posibilidad de ajustar al detalle las propiedades nanoscópicas de estos compuestos exóticos promete todo un abanico de aplicaciones técnicas

Stefanie Dehnen y Thomas F. Fässler

Las diferencias entre metales y sales parecen palmarias. Los primeros son brillantes, opacos y se dejan deformar con facilidad; las segundas forman cristales más o menos transparentes que se parten al golpearlos con un martillo. Los metales conducen la corriente eléctrica; las sales, cuando se encuentran en estado sólido, son aislantes. También desde un punto de vista químico muestran unos y otras grandes diferencias. Por regla general, las sales se forman al combinar un metal y uno o varios no metales, los cuales aparecen siempre en una proporción relativa fija. Los metales, en cambio, o se encuentran en estado puro o, si se trata de aleaciones, suelen corresponder a mezclas homogéneas con proporciones muy variables de sus componentes.



CORTESÍA DE THOMAS F. FÄSSLER

ESTRUCTURA COMPLEJA: El compuesto $Na_{20}Zn_8Sn_{11}$ tal vez constituya la fase de Zintl más intrincada conocida hasta ahora. Esta representación de sus celdas elementales muestra los aniones metálicos lineales $[Sn\text{-}Zn\text{-}Sn]^{6-}$ (*azul-verde-azul*) y la agrupación icosaédrica $[Zn_7Sn_5]^{6-}$ (*amarillo*). Entre ellos se encuentran, a modo de «masilla», iones positivos de sodio, los cuales conforman poliedros regulares (*naranja*). El código de colores indica los átomos de estaño (*azul*), zinc (*verde*) y sodio (*rojo*).

Stefanie Dehnen es catedrática de química inorgánica en la Universidad de Marburgo y especialista en química cuántica.

Thomas F. Fässler es catedrático de química inorgánica de la Universidad Técnica de Múnich. Investiga la obtención de nuevos materiales.

La mayor parte de las sales se disuelven en líquidos polares como el agua. Un ejemplo familiar lo hallamos en el cloruro de sodio, o sal común, en el que cada átomo de sodio cede un electrón a uno de cloro. Tanto en solución acuosa como en su forma cristalina, existen iones de sodio con carga positiva e iones cloruro con carga negativa. En estado sólido, dichos iones forman una red; disueltos, los cationes y aniones correspondientes gozan de libertad de movimiento, por lo que pueden conducir la electricidad. Sin embargo, los electrones que toman parte en los enlaces metálicos se distribuyen de manera uniforme por todo el sólido. Y, en las aleaciones comunes, como el bronce o el latón, solo existen diferencias mínimas entre las cargas de los átomos (cobre y estaño o cobre y zinc, en estos casos), por lo que sus componentes no pueden disolverse en los solventes habituales.

Esas diferencias comenzaron a ponerse en tela de juicio a finales del siglo xix, cuando los avances en criogenia brindaron la posibilidad de licuar amoníaco y los químicos observaron que algunos metales sí podían disolverse en él. El sodio, por ejemplo, daba lugar a soluciones de un color azul intenso. En 1891, Alexander Joannis comprobó que, al añadir plomo, este también se disolvía y la solución inicialmente azul adoptaba una tonalidad verde. A principios del siglo xx, Charles A. Kraus investigó las propiedades electroquímicas de dichas disoluciones. Para su sorpresa, halló que contenían iones metálicos positivos y también negativos. El investigador concluyó que estos últimos debían ser átomos de plomo que habían aceptado electrones del sodio.

Dado lo poco comunes que resultaban los iones metálicos con carga negativa, una pregunta natural era qué tipo de sólido se formaría al evaporar el disolvente. ¿Se trataría de una aleación común de sodio y plomo, o de una sal compuesta de iones? La respuesta llegó en los años treinta de la mano de Eduard Zintl, quien primero investigó la cuestión en el Instituto de Química Inorgánica de Friburgo y, después, en la Escuela Técnica de Darmstadt. Mediante procedimientos de química analítica y química física, Zintl dedujo que la solución de amoníaco contenía el «polianión metálico» $(Pb_9)^{4-}$: una molécula formada por nueve átomos de plomo y dotada de cuatro cargas negativas. El residuo que quedaba al evaporar el amoníaco era un sólido con una proporción de sodio y plomo en razón de 4 a 9. Aunque el análisis de la estructura de esta combinación inusitada «Na_4Pb_9» constituye aún hoy una tarea pendiente, los experimentos con difracción de rayos X permitirían más tarde confirmar la existencia del inusual polianión y esclarecer su estructura.

Tras investigaciones ulteriores, Zintl llegó a la conclusión de que los electrones se transferían del sodio al plomo incluso cuando ambos metales se fundían juntos. Es decir, que no era necesario que pasaran por una etapa previa en la que los iones se separasen, como ocurre al preparar una disolución. En los años que siguieron, el investigador identificó numerosos polianiones metálicos. La pauta era siempre la misma: se combinaba un metal alcalino o alcalinotérreo (los elementos del primer o segundo grupo de la tabla periódica), caracterizados por su facilidad para ceder electrones, con un metal o un metaloide de los grupos 13, 14 o 15, los cuales tienden a aceptar electrones. Zintl llamó «compuestos metálicos salinos» a tales aleaciones de estequiometría definida y repartición asimétrica de cargas. A modo de homenaje póstumo al científico, fallecido joven, más tarde dichos compuestos fueron rebautizados con el nombre de fases de Zintl, y los iones correspondientes, iones de Zintl. El término *fase* se refiere aquí a un estado de composición y estructura bien definidos y estable en cierto intervalo de presión y temperatura.

Por desgracia, Zintl nunca llegó a averiguar la estructura tridimensional de sus insólitos aniones. La dificultad para ello radica en que, al evaporar el disolvente, el residuo o bien se descompone, o bien se convierte en un polvo amorfo cuya estructura no puede resolverse mediante técnicas de difracción de rayos X o de neutrones. Solo en los años setenta y de manera casi simultánea, primero en Alemania y luego en EE.UU., resultó posible esclarecer la disposición espacial de los átomos que componen los polianiones metálicos obtenidos a partir de tales soluciones. Ello se consiguió gracias a ciertas sustancias orgánicas capaces de «envolver» a los cationes y, de esa manera, aumentar artificialmente su tamaño. En el proceso se forma un empaquetamiento de iones estable, lo que permite su posterior cristalización. Además, los cationes así protegidos no pueden recuperar con facilidad los electrones cedidos en su momento ni, por ende, recobrar la forma característica de los metales neutros.

IONES DE ZINTL

A pesar de su constitución iónica, las fases de Zintl se diferencian claramente de las sales habituales, tanto en disolución como en estado sólido. Por su aspecto y comportamiento podríamos calificarlas como sólidos de tipo aleación, similares a semiconductores como el silicio. Poseen un color oscuro y un brillo metálico ocasional. Al aumentar su temperatura condu-

EN SÍNTESIS

Las aleaciones como el bronce, cuyos componentes se hallan muy próximos en la tabla periódica, presentan el mismo tipo de enlace que los metales puros. Los electrones más externos de cada átomo forman un «mar» que se extiende por todo el sólido.

Sin embargo, cuando los metales del borde izquierdo de la tabla se combinan con otros situados más a la derecha, los electrones se reparten de manera desigual y aparecen iones con cargas opuestas, como en las sales. Estos compuestos se denominan fases de Zintl.

Los aniones correspondientes constan a menudo de agrupaciones de varios átomos. Estas pueden unirse entre sí en etapas sucesivas y dar lugar a estructuras mayores, así como combinarse con metales de transición, tierras raras o incluso compuestos orgánicos.

Todo ello permite diseñar nanopartículas cuyas propiedades pueden ajustarse a voluntad: una característica que promete un sinnúmero de aplicaciones en la fabricación de células fotovoltaicas, catalizadores o piezas básicas para futuros ordenadores cuánticos.

cen la electricidad, aunque no demasiado bien. Al contrario que las sales usuales, suelen mostrarse muy sensibles al aire y a la humedad, razón por la que no se encuentran en la naturaleza y por la que resultan difíciles de manipular. Solo se disuelven en líquidos poco comunes, como el amoníaco (un gas venenoso que se licua a 40 grados Celsius bajo cero) o la etilendiamina. Además, dichas soluciones se desestabilizan con facilidad, en un proceso que recompone los metales y forma un precipitado pulverulento.

Cuando los iones de Zintl constan de un solo átomo de metal, captan tantas cargas negativas como sean necesarias para que su capa electrónica más externa adquiera ocho electrones; un ejemplo de la conocida regla del octeto. El plomo, por ejemplo, que en condiciones normales presenta cuatro electrones en su capa más externa, en la fase de Zintl Mg_2Pb toma cuatro electrones procedentes de dos átomos de magnesio, por lo que queda en la forma Pb^{4-}. La disposición de los iones en el cristal corresponde a la del óxido de litio (Li_2O, una sal clásica), donde el Mg^{2+} sustituye al Li^{+} y el Pb^{4-} al O^{2-}. Esta concordancia estructural supone otro fuerte indicio de que las fases de Zintl constan de iones.

¿Qué tipo de enlaces aparecen en los polianiones formados por más de un átomo? Al igual que ocurre con las moléculas normales, los átomos de un polianión establecen tantos enlaces covalentes como hagan falta para completar su octeto de electrones. En el caso del siliciuro de potasio, por ejemplo, se forman aniones $(Si_4)^{4-}$ tetraédricos. Cada átomo de silicio adquiere una carga negativa, por lo que su capa electrónica externa toma la misma configuración que la del fósforo (el elemento contiguo en la tabla periódica). Así pues, y como «pseudoátomo» de fósforo, el ion acaba adquiriendo la misma estructura tetraédrica que el fósforo blanco, P_4, en el que cada átomo se halla unido a otros tres, con cada uno de los cuales comparte un par de electrones. Sumados a otro par de electrones no compartidos, llegamos al total de ocho electrones en la capa más externa.

Pero no todos los aniones de Zintl se dejan describir mediante una analogía tan sencilla. Existe toda una variedad de aniones moleculares con estructura «de jaula» en la que los electrones se hallan distribuidos de manera uniforme sobre un entramado con forma de poliedro. En cierto modo resultan semejantes a las moléculas aromáticas; sin embargo, y a diferencia de estas, los iones de Zintl pueden conformar estructuras no solo planas, sino también tridimensionales.

La composición y la carga de los aniones determinan la solubilidad de las fases de Zintl. En general, son insolubles si contienen átomos aislados dotados de carga elevada, como ocurría con el plomburo de magnesio (Mg_2Pb) citado arriba. Lo mismo se aplica a las fases de Zintl con aniones «infinitamente extendidos» que forman cadenas, redes bidimensionales o incluso tridimensionales. En cambio, los compuestos como el Na_4Pb_9, en el que cuatro electrones se reparten entre nueve átomos de plomo, resultan solubles en amoníaco líquido, aminas o amidas. Ello brinda la posibilidad de manipularlos por métodos de vía húmeda, lo que a menudo resulta más sencillo que hacerlo en estado sólido.

Debido al creciente interés por desarrollar nuevos materiales semiconductores para aplicaciones como la captación y almace-

CLASES DE COMPUESTOS

Sales, aleaciones metálicas y fases de Zintl

A Metal + No Metal	→	**Sal**	
$2\ Na + Cl_2$	→	$2\ Na^{+}Cl^{-}$	Sal común
NaCl (sal sólida) + Agua	→	Na^{+} (disuelto) + Cl^{-} (disuelto)	Solución salina
B Metal + Metal	→	**Aleación metálica**	
3 Cu + 5 Sn	→	Cu_3Sn_5 (metal)	Bronce
C Metal + Metal	→	**Fase de Zintl**	
4 Na + 9 Sn	→	Na_4Sn_9 (compuesto salino)	Fase de Zintl
Na_4Sn_9 (fase de Zintl) + Amoníaco líquido	→	4 Na^{+} (disuelto) + $(Sn_9)^{4-}$ (disuelto)	Fase de Zintl disuelta

A Si hacemos pasar cloro en estado gaseoso sobre sodio fundido, obtendremos sal común incolora. En ella, cada átomo de sodio cede un electrón a un átomo de cloro, de modo que se generan cationes de sodio y aniones cloruro unidos en una red de iones. A causa de las intensas fuerzas de atracción electrostática entre iones de carga opuesta, la formación de esta estructura libera grandes cantidades de energía. La unión cristalina entre iones se deshace al sumergirlos en un disolvente polar, como el agua. Los iones quedan entonces rodeados por las moléculas del disolvente y pueden moverse con libertad.

B Si se funden dos o más metales y el producto se deja enfriar, el resultado suele ser una aleación metálica. Un ejemplo cotidiano lo hallamos en el bronce, formado por cobre y estaño. En una aleación de este tipo, todos los átomos comparten de manera equitativa los electrones más externos.

C Algo muy distinto ocurre al fundir estaño y sodio. El sodio presenta una fuerte tendencia a ceder electrones, los cuales son aceptados con facilidad por el estaño. Así, la aleación resultante contiene átomos de sodio dotados de carga positiva e iones de estaño con carga negativa. En cierto sentido, se trata también de una sal, si bien formada únicamente por metales. Sin embargo, cada átomo de estaño no aceptará electrones por separado; en su lugar, los átomos del metal formarán el polianión $(Sn_9)^{4-}$, una estructura compuesta y de geometría poliédrica. En honor al químico alemán Eduard Zintl, quien estudió sus propiedades durante los años treinta del siglo XX, estos compuestos reciben el nombre de fases de Zintl. Son inestables en presencia de agua, pero se disuelven a menudo en amoníaco líquido, en cuyo caso se disocian en cationes y polianiones.

namiento de energía solar, las dos últimas décadas han conocido un renovado interés por las fases de Zintl. Por un lado, ello obedece a sus propiedades semiconductoras. Por otro, los polianiones metálicos ocupan un puesto muy especial entre las moléculas pequeñas y los sólidos metálicos de estructura reticular. Se trata de partículas cuyas dimensiones rondan el nanómetro y que, en un compuesto, conservan todas exactamente el mismo diámetro. Además, pueden modificarse de múltiples maneras, lo que permite efectuar un ajuste fino de sus propiedades. Todo ello promete aplicaciones fascinantes.

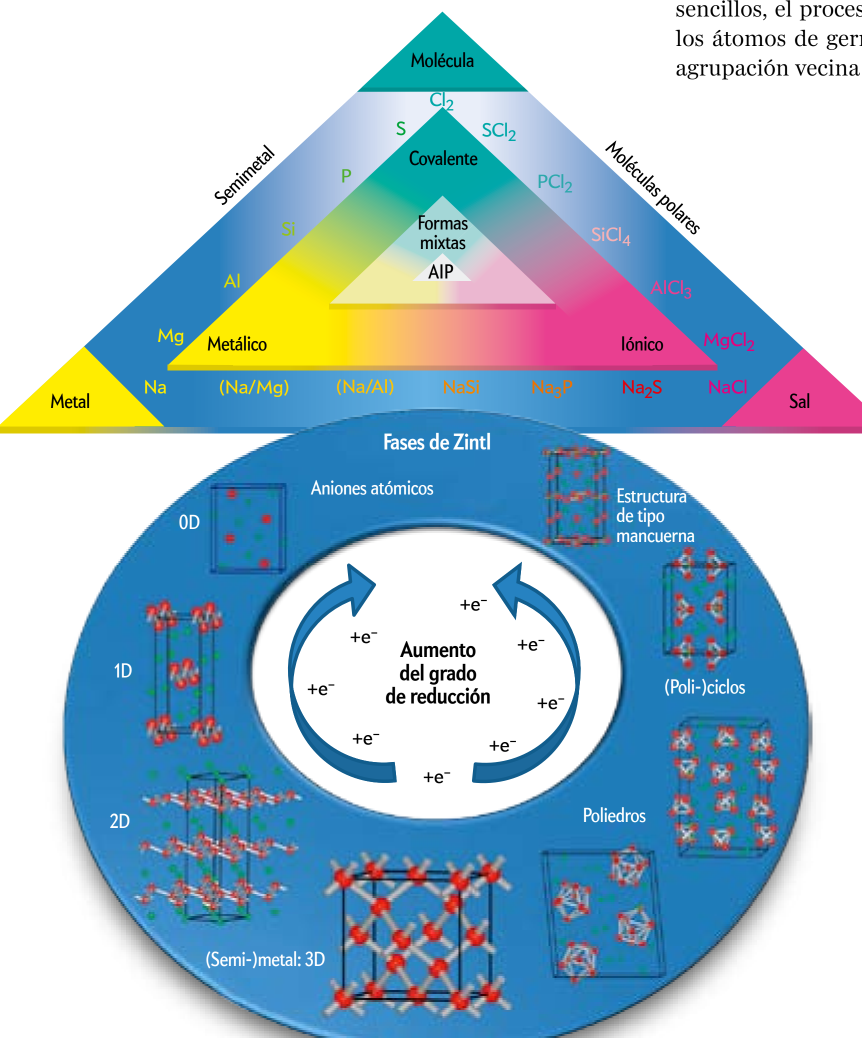
La electrónica del futuro requerirá materiales semiconductores nanoestructurados diseñados a medida. La mejor manera de controlar sus propiedades pasa por fabricarlos a partir de componentes moleculares que conserven ampliamente sus características estructurales. Los iones solubles de Zintl de átomos metálicos y semimetálicos gozan, en este sentido, de propiedades ideales. A partir de ellos, deberían de poder fabricarse semiconductores con una estructura muy bien definida a escala nanométrica. Los polianiones metálicos, por ejemplo, podrían usarse como puntos cuánticos (estructuras nanoscópicas cuyas propiedades ópticas y electrónicas pueden regularse con precisión a partir de su tamaño) o como nanopartículas para catalizadores. Ello los convertiría en piezas básicas muy prometedoras para la fabricación de nanoláseres, futuros ordenadores cuánticos o transistores de un solo electrón.

En la actualidad, la investigación sobre fases de Zintl y las agrupaciones metálicas a las que dan lugar se desarrolla principalmente en tres frentes: la unión de polianiones para formar dímeros, cadenas o redes; la adición de uno o más átomos de metales de transición para formar agrupaciones intermetaloides; y la combinación con grupos orgánicos con compensación parcial de carga negativa.

UNIÓN DE POLIANIONES

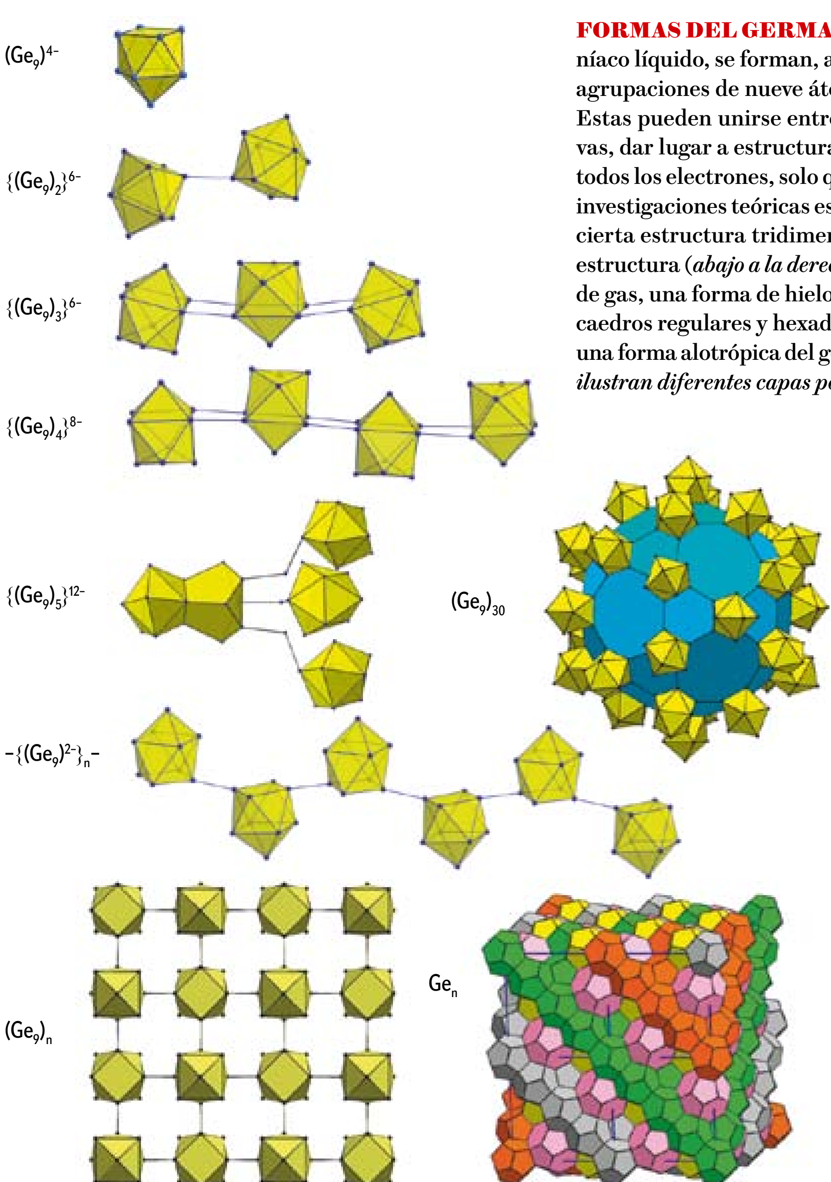
Debido a su exceso de electrones, las agrupaciones de Zintl dotadas de carga negativa muestran una reactividad muy elevada. Para asentarse en una configuración más estable, tienden a ceder electrones hasta que el átomo de metal se reconstituye por completo. No obstante, si este proceso se interrumpe a tiempo, las mismas reacciones de oxidación pueden aprovecharse para unir varios polianiones mediante enlaces covalentes. Ello proporciona las condiciones necesarias para un crecimiento controlado de las agrupaciones metálicas originales.

Las primeras uniones de aniones de Zintl de nitrogenoideos (elementos del grupo 15 de la tabla periódica) se lograron en la década de los ochenta. En el caso de los carbonoideos (grupo 14), sin embargo, el éxito no llegó hasta hace pocos años, cuando se logró con átomos de germanio. Para ello se emplearon agrupaciones de nueve átomos de germanio $(Ge_9)^{4-}$, análogas al $(Pb_9)^{4-}$ mencionado al principio, las cuales pueden unirse de una en una mediante reacciones de acoplamiento oxidativo. En términos sencillos, el proceso consiste en extraer un electrón de uno de los átomos de germanio y, después, unir el conjunto con una agrupación vecina a la que también se ha extraído un electrón.



PROPIEDADES MIXTAS: Al considerar sus enlaces químicos y compararlos con otras sustancias conocidas (*diagrama superior*), las fases de Zintl pueden situarse a medio camino entre los metales y las sales. El esquema inferior ilustra cómo un metal o semimetal con una estructura reticular en 3D, como el silicio (*abajo*) puede, mediante sucesivas reacciones de reducción, formar compuestos con aniones metálicos (*izquierda*) de dos, una o incluso cero dimensiones (es decir, átomos), así como agrupaciones aniónicas cada vez menores (*derecha*), como las que se encuentran en las fases de Zintl.

STEFANIE DEHNEN Y CAROLINE RÖHR, UNIVERSIDAD DE FRIBURGO



FORMAS DEL GERMANIO: Al disolver sodio y germanio (Ge) en amoníaco líquido, se forman, además de iones de sodio con una carga positiva, agrupaciones de nueve átomos de germanio con cuatro cargas negativas. Estas pueden unirse entre sí y, mediante reacciones de oxidación sucesivas, dar lugar a estructuras cada vez mayores (*figuras*). Una vez extraídos todos los electrones, solo queda germanio elemental. Aunque según varias investigaciones teóricas este debería reunir las agrupaciones originales en cierta estructura tridimensional, experimentalmente se ha obtenido una estructura (*abajo a la derecha*) cuya geometría recuerda a la de los hidratos de gas, una forma de hielo muy porosa. Formada por una mezcla de dodecaedros regulares y hexadecaedros de mayor tamaño (*violeta*), representa una forma alotrópica del germanio desconocida hasta hace poco (*los colores ilustran diferentes capas poliédricas huecas*).

CORTESÍA DE THOMAS F. FÄSSLER

El primero en combinar dos aniones $(Ge_9)^{4-}$ mediante dicho procedimiento fue Slavi S. Sevov, de la Universidad de Notre Dame. El récord actual, consistente en la unión de cinco unidades, fue logrado por uno de nosotros (Fässler) y sus colaboradores. En la agrupación de Ge_{45} resultante, cuatro unidades conservan intacta su forma original, mientras que la quinta conecta las otras cuatro de manera covalente. Tras una oxidación completa de los iones de Zintl, todas las unidades de Ge_9, ahora neutras, quedan conectadas entre sí. Según se desprende de cálculos en química cuántica, deberían conservar su geometría original y permanecer como elementos estructurales anexos.

Arnold M. Guloy, de la Universidad de Houston, y Yuri Grin, del Instituto Max Planck de Físicoquímica del Estado Sólido de Dresde, no lograron confirmar experimentalmente dicha predicción teórica. Sin embargo, hallaron una estructura no menos espectacular: un bastidor tridimensional de átomos de germanio permeado por huecos, con una geometría que hasta ahora solo se había observado en los hidratos de gas, una forma de hielo muy porosa en cuyas oquedades permanecen encerrados por medios mecánicos gases como metano, helio o cloro. En el compuesto de germanio, en cambio, los huecos permanecen vacíos.

Esta insólita «estructura de clatrato» ha despertado un gran interés entre los investigadores, ya que constituye una forma alotrópica del germanio hasta ahora desconocida. En este sentido, se asemeja a las célebres buckybolas: los fullerenos con forma de balón de fútbol que, a mediados de los años ochenta, fueron descubiertos como una nueva forma alotrópica del carbono. Otra característica común a ambos compuestos se halla en sus cavidades poliédricas. En la actualidad, los investigadores intentan transformar otras fases de Zintl de forma análoga.

AGRUPACIONES INTERMETALOIDES

Otra línea de investigación que despierta gran interés es la que se dedica a estudiar las agrupaciones «intermetaloides». El término engloba agregados solubles de átomos de más de un tipo de metal o semimetal; por ejemplo, combinaciones de metales del grupo principal con elementos de transición o tierras raras. En el sentido más estricto del término, los compuestos deberían mostrar algunas de las características estructurales de las llamadas fases intermetálicas, como números de coordinación elevados (es decir, que cada uno de los átomos de uno de los componentes metálicos se encuentre rodeado por al menos ocho de los del otro tipo).

Las agrupaciones intermetaloides forman una gran familia dentro de los polianiones metálicos. Para su síntesis pueden emplearse iones de Zintl solubles formados por átomos de un solo tipo (homoatómicos) o de dos (heteroatómicos), los cuales se disuelven junto con átomos de metales de transición inicialmente rodeados de ligandos orgánicos. Durante la reacción se desprenden de ellos, de modo que quedan «desnudos» antes de unirse a los iones de Zintl. En ocasiones pueden conservar algún fragmento del ligando, en cuyo caso solo se unen de manera lateral al anión de Zintl, que preserva su estructura original.

Una variante notable de este tipo de compuestos la hallamos en las agrupaciones endohedriales. En ellas, hasta tres átomos de metales de transición se hallan confinados en el interior de una «jaula» formada por átomos metálicos. Tales estructuras anidadas suelen denotarse mediante el símbolo @. Aquí ha-

llamos otra sorprendente similitud con los fullerenos, ya que estos también pueden albergar átomos foráneos en su interior.

Los aniones de Zintl endohedriales más pequeños conocidos son el $[Ni@Ge_9]^{3-}$, que alberga en su interior un átomo de níquel, y el $[Cu@E_9]^{3-}$, en el que un átomo de cobre se encuentra atrapado por una envoltura de átomos de estaño o plomo. Si estos aniones se presentan en un sólido cristalino, la jaula adopta a menudo la misma estructura que en los aniones de Zintl homoatómicos sin átomos extraños en su interior. En disolución, tal y como puede verificarse mediante espectroscopía de resonancia magnética nuclear, la disposición de los átomos de la envoltura cambia con rapidez entre varias configuraciones posibles. Estas «fluctuaciones» constituyen una característica particular de los polianiones endohedriales con enlaces débiles entre los átomos de metal.

Según se ha demostrado en el laboratorio y mediante cálculos de química cuántica, las agrupaciones intermetaloides vacías no pueden agrandarse a voluntad. El ejemplar aislable de mayor tamaño conocido es $(E_{10})^{2-}$, donde la E indica aquí germanio o plomo. Con átomos de relleno, en cambio, estas estructuras permanecen estables con 12, 14, 17 y 18 átomos. El récord lo constituyen los aniones $[Pd_2@Ge_{18}]^{4-}$ y $[Pt_2@Sn_{17}]^{2-}$: grandes envolturas de germanio o estaño que albergan, respectivamente, dos átomos de paladio o de platino. La síntesis y caracterización de estos compuestos se debe a los grupos de Sevov y de Bryan Eichhorn, de la Universidad de Maryland en Baltimore.

Existen algunas estructuras que aparecen con relleno pero que, sin embargo, son imposibles sin él. A este grupo pertenecen, entre otras, las agrupaciones intermetaloides $[Fe@Ge_{10}]^{3-}$ y $[Co@Ge_{10}]^{3-}$, que albergan hierro y cobalto en su interior. En estos casos, la forma poliédrica de la envoltura de germanio no se compone de caras triangulares, como suele ser habitual, sino que forma prismas pentagonales, una ordenación singular y mal comprendida por los investigadores. Uno de nosotros (Dehnen) y sus colaboradores han logrado preparar una jaula con tres átomos de metales de transición en su interior. El polianión, de fórmula $[Pd_3@Sn_8Bi_6]^{4-}$, alberga un anillo de tres átomos de paladio casi neutro, el cual flota en el interior de una envoltura formada por ocho átomos de estaño y seis de bismuto.

Cuando los átomos de metales de transición participan en la formación de la envoltura, o cuando los polianiones constan de varias capas dispuestas a modo de cebolla, aparecen fórmulas

ESTRUCTURA

El enlace en los polianiones de Zintl

En general, un átomo con *N* electrones de valencia formará 8 – *N* enlaces con átomos vecinos. Ello se debe a la conocida regla del octeto, según la cual todos los átomos de una molécula tienden a adquirir la configuración electrónica de un gas noble. Así pues, los elementos del quinto grupo principal de la tabla periódica, como el fósforo o el arsénico, formarán de manera natural tres enlaces. Un ejemplo lo hallamos en las moléculas tetraédricas del fósforo blanco, P_4, en las que cada átomo de fósforo queda unido a otros tres.

En el caso de los polianiones metálicos con *N* electrones de valencia por átomo, la cantidad de enlaces que pueden formar sigue siendo 8 – *N*, incluso cuando el átomo neutro del metal correspondiente posea un número diferente de electrones de valencia y, por tanto, tienda a formar otra cantidad de enlaces. Por ejemplo, la agrupación $[Sn_4]^{4-}$ contiene cuatro átomos de estaño con una carga negativa cada uno y, por tanto, con cinco electrones de valencia en lugar de los cuatro usuales. En consecuencia, cada uno de ellos tenderá a establecer no cuatro, sino tres enlaces, al igual que un átomo de fósforo. Decimos que los polianiones que cumplen esta regla muestran una «situación de valencia normal».

Sin embargo, cuando un polianión consta de elementos del cuarto grupo principal y adopta la forma de un deltaedro (un poliedro de caras triangulares), el numero de electrones disponibles no alcanza para formar 8 – *N* enlaces covalentes. Así ocurre, por ejemplo, con el polianión $(Pb_9)^{4-}$. ¿Cómo describir lo que ocurre en estos casos?

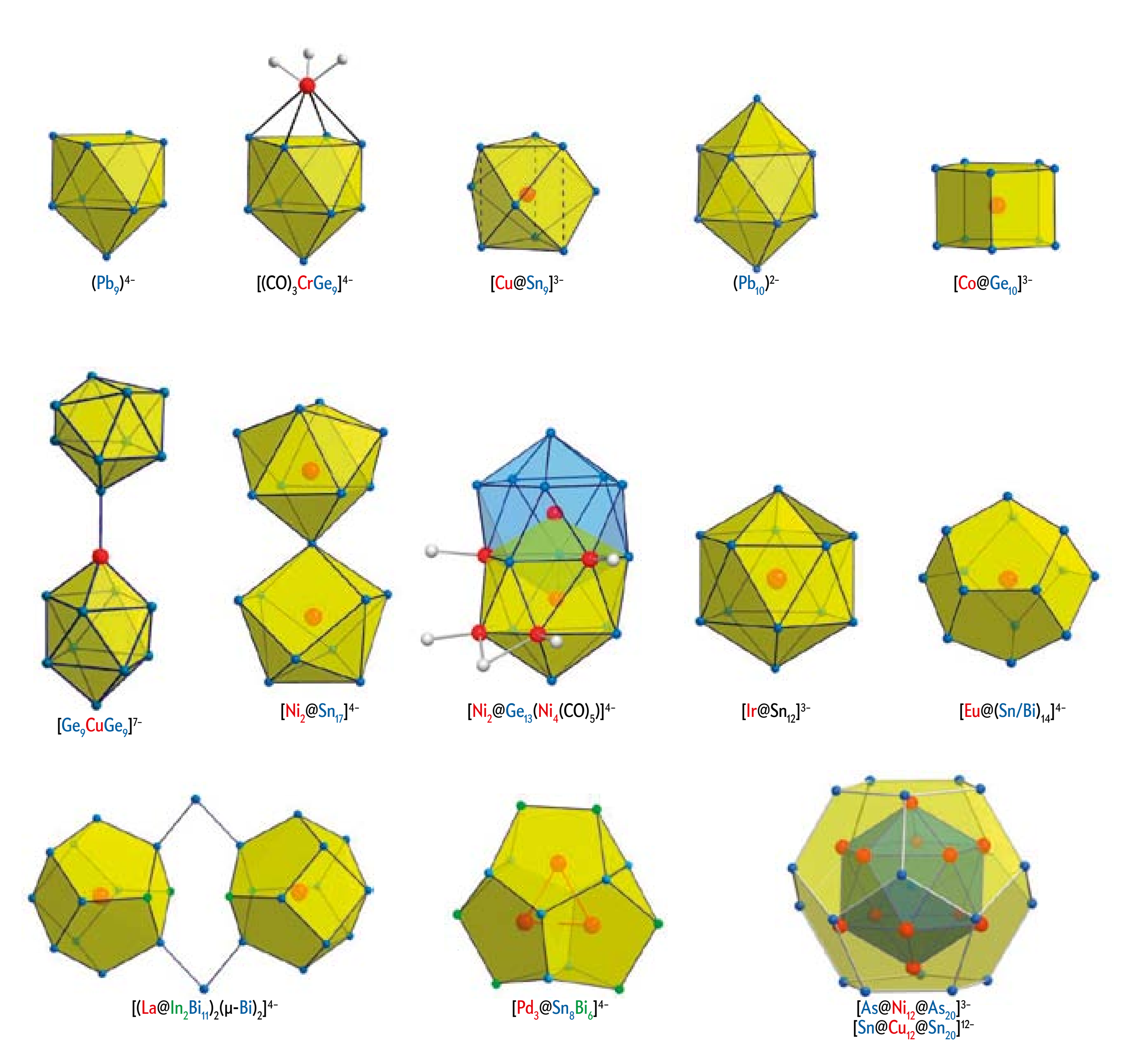
Las reglas más utilizadas fueron desarrolladas en los años setenta por Kenneth Wade, de la Universidad de Durham, para compuestos de tipo borano, como el anión icosaédrico dodecaborato $(B_{12}H_{12})^{2-}$, y ampliadas luego por D. Michael P. Mingos, de la Universidad de Oxford, para otras agrupaciones con déficit de electrones. Las reglas de Wade-Mingos establecen una relación entre el número total de electrones de valencia de los átomos que forman una agrupación y su estructura.

Entre los aniones de Zintl descritos aquí, los deltaedros con $4n + 2$ electrones de valencia (donde *n* denota el número de átomos) resultan particularmente estables. Un ejemplo nos lo proporciona la agrupación $(Pb_{10})^{2-}$ (con $4 \times 10 + 2$ electrones de valencia), que adopta la forma de un antiprisma cuadrado con dos picos. Las agrupaciones con más electrones de valencia ($4n + 4$, $4n + 6$, etcétera) forman deltaedros a los que les falta un número creciente de vértices. Así sucede con la agrupación $(Pb_9)^{4-}$ ($4 \times 9 + 4$ electrones de valencia), la cual presenta una estructura poliédrica similar a la del $(Pb_{10})^{2-}$, pero con un vértice menos.

Otros modelos a los que en ocasiones se ha recurrido para explicar los aniones de Zintl pueden clasificarse como modelos de capas esféricas. Proporcionan «números mágicos» de electrones que generan agrupaciones especialmente estables, con independencia de la posición precisa y el número exacto de átomos que contengan.

Para simplificar, se considera la agrupación atómica como una bola y, a modo de aproximación, se asume que los electrones se mueven bajo la influencia de un potencial esférico, como en un átomo aislado. Las funciones matemáticas resultantes y los números cuánticos que se derivan de ellas permiten describir los electrones de estos sistemas complejos de un modo muy similar a los de un átomo. Gracias a ello, pueden extraerse conclusiones sobre los niveles electrónicos y sobre la estabilidad de la agrupación molecular correspondiente.

Estos modelos simplificados solo sirven para describir parcialmente la agrupación, cuya forma nunca es exactamente esférica. Los investigadores han concebido varias modificaciones para incorporar en los modelos la estructura real de los polianiones, pero, en general, estos dan mejores resultados cuanto mayor sea la simetría o esfericidad de la agrupación atómica.



ESTRUCTURAS ANIDADAS: Los aniones de Zintl intermetaloides se caracterizan por la inclusión de uno o varios átomos de metales de transición o tierras raras (*rojo*). El símbolo @ indica que el grupo de átomos que figura a la izquierda se encuentra anidado en el que consta a la derecha. Estas combinaciones pueden presentar estructuras muy diversas, una selección de las cuales se muestra aquí. Algunos presentan ligandos orgánicos, como monóxido de carbono (CO, *gris*). Las estructuras más complejas constan de varias capas dispuestas a modo de cebolla (*abajo a la derecha*).

CORTESÍA DE THOMAS F. FÄSSLER

y estructuras aún más complejas. Eichhorn y sus colaboradores consiguieron sintetizar una de ellas con átomos de níquel y arsénico: el anión $[As@Ni_{12}@As_{20}]^{3-}$, aislado por los investigadores en una solución en etilendiamina del anión de Zintl $(As_7)^{3-}$ y el complejo de níquel $Ni(COD)_2$, donde COD simboliza el ciclooctadieno. En él, el átomo central de arsénico se halla rodeado por un icosaedro compuesto por 12 átomos de níquel, todo ello envuelto a su vez por un dodecaedro pentagonal de 20 átomos de arsénico.

Si bien en el último ejemplo la capa más externa la compone un semimetal, en el polianión $[Sn@Cu_{12}@Sn_{20}]^{12-}$ solo aparecen metales. Sintetizado por el equipo de uno de nosotros (Fässler), presenta la misma estructura que el anterior, aunque para completar la capa de valencia son necesarias no tres, sino doce cargas negativas. Eso hace que no resulte posible disolver este anión, que solo se presenta en estado sólido y acompañado de cationes de metales alcalinos, como el sodio. De hecho, se obtuvo a partir de una reacción en estado sólido de bronce (estaño y cobre) y sodio en una ampolla de niobio a 450 grados Celsius. En el compuesto resultante, el sodio forma «tabiques» que se extienden a lo largo del bronce y lo dividen en pequeñas agrupaciones.

Aún se ignora cómo se forman muchas de estas agrupaciones endohedriales, ya sea por disolución o por fusión a altas temperaturas. La vía más investigada ha sido la disolución, para la que se han propuesto tres posibles mecanismos. En el caso más sencillo, un átomo de metal de transición liberado de su compuesto inicial penetraría en una jaula incipiente compuesta por metales de grupo principal. Para ello, sin embargo, esta debe abrirse temporalmente, por lo que parece más probable algún mecanismo que permita que el átomo de metal de transición se

una al polianión, pero manteniendo en un primer momento parte de los ligandos orgánicos originales. Este producto intermedio, en ocasiones recubierto, se reorganizaría en una etapa posterior en la que el átomo de metal de transición se desprendería del resto de sus ligandos y pasaría a ocupar la posición central. El tercer mecanismo postula que los átomos del anión de Zintl se disgregarían primero en presencia del metal de transición para, más tarde, volver a reagruparse a su alrededor.

Sin embargo, quedan varias cuestiones sin respuesta. Por ejemplo, ¿por qué, al reaccionar con una unidad de Pb_9, un átomo de níquel provoca que el plomo se reordene como una agrupación de diez átomos, pero el mismo átomo se rodea sin problemas de nueve átomos de germanio a pesar de ser estos mucho menores? Parece probable que la diferencia de tamaños no desempeñe ningún papel. Como se ha mencionado antes, en disolución estas estructuras «basculan» entre diferentes configuraciones de equilibrio. Cuál de ellas se aísla en estado cristalino dependerá de la solubilidad de cada sustancia bajo unas condiciones u otras.

En lo que concierne a sus posibles aplicaciones, algunas características del metal cautivo pueden afectar a la totalidad del ion de Zintl, que, por ejemplo, puede adquirir propiedades magnéticas. Por regla general, también se altera la energía necesaria para excitar los electrones. En cierto sentido, la inclusión de átomos de metales de transición equivale al dopado de semiconductores, solo que a nivel molecular.

Los aniones intermetaloides revisten un gran interés en química cuántica. En particular, los investigadores intentan descubrir la relación entre su estructura y el número y repartición de los electrones. Estas agrupaciones pueden interpretarse como átomos de gran tamaño, o «superátomos», con un centro en torno al cual se extienden capas electrónicas radiales. Aquellas configuraciones cuyas capas se encuentran repletas destacan por su estabilidad; una manera de verlas que permite explicar algunas de las estructuras más frecuentes.

Los teóricos han empleado varios modelos para describir el ordenamiento de los átomos en los aniones de Zintl y sus diferentes tipos de enlaces. Sin embargo, ninguno de esos modelos fue desarrollado originalmente para describir estas sustancias. En su empeño por describir las agrupaciones de Zintl de la manera más general posible, los investigadores han recurrido a modelos exitosos en otros contextos.

ADICIÓN DE GRUPOS ORGÁNICOS

El tercer frente de investigación explora la unión de agrupaciones de Zintl con grupos orgánicos u otros sustituyentes. En este caso, se comportan de manera análoga a la unión de varios aniones. Ya en las últimas décadas del siglo xx se prepararon, investigaron y modificaron algunos compuestos basados en polianiones de elementos del grupo 15, un campo en el que destacó Hans Georg von Schnering. Junto con sus colaboradores del Instituto Max Planck para el Estado Sólido de Stuttgart, logró combinar, entre otros, aniones de Zintl de fósforo, como $(P_7)^{3-}$, con grupos trimetilsililo, $(SiMe_3)^+$.

Una vez más, los elementos del grupo de los carbonoideos, al contar con menos electrones, resultan más problemáticos, ya sea porque al formar un anión de Zintl deben soportar un mayor número de cargas negativas por átomo, o bien porque la menor cantidad de electrones en el conjunto de la jaula los torna insolubles. Desde 1993 se conocen estructuras tetraédricas de la forma (R_4E_4), donde E denota silicio o germanio, y R, un grupo sililo (en este caso, con restos de butilo terciario). Sin embargo, estas moléculas no se obtuvieron a partir de aniones de Zintl. Solo en 2007 se consiguió compensar parcialmente la cuádruple carga negativa de algunos compuestos con $(Ge_9)^{4-}$ y $(Sn_9)^{4-}$ mediante ligandos con carga formal positiva, como el supersililo $\{Si(SiMe_3)_3\}^+$. En 2012, el grupo de Sevov logró compensar por completo las cuatro cargas del $(Ge_9)^{4-}$ original.

Algunos iones de Zintl así modificados exhiben propiedades interesantes. Por ejemplo, se tornan solubles en disolventes orgánicos, gracias a lo cual pueden tomar parte en otras reacciones que, de otro modo, serían inviables, lo que permite ampliar el espectro de sus propiedades y procurar una mayor estabilidad. A través de sus ligandos orgánicos, estas agrupaciones tal vez puedan incorporarse a un polímero y formar películas artificiales con actividad catalítica. El armazón orgánico podría además servir para atrapar determinados sustratos cuya reacción química sería catalizada por el polianión.

Con fines prácticos, una estrategia muy prometedora pasa por combinar las tres líneas de investigación que hemos mencionado aquí. Por ejemplo, las propiedades electrónicas de las agrupaciones intermetaloides pueden mejorarse mediante la unión oxidativa de polianiones. Aisladas, las correspondientes fases de Zintl son en la práctica semiconductores con una gran separación entre bandas, por lo que promover electrones de la banda de valencia a la de conducción requiere un aporte considerable de energía. Cuando se unen varias agrupaciones, la separación entre bandas disminuye. De esta manera, el germanio «mesoestructurado», obtenido mediante oxidación suave del grupo $(Ge_9)^{4-}$, posee propiedades semejantes a las del silicio y resulta adecuado para la fabricación de células solares o componentes optoelectrónicos.

Pero incluso para el silicio, mucho más económico que el germanio y protagonista absoluto de la electrónica actual, surgen fascinantes posibilidades. Las últimas investigaciones del grupo de Nikolaus Korber, de la Universidad de Ratisbona, han demostrado que los polianiones de silicio $(Si_4)^{4-}$ y $(Si_9)^{4-}$ son solubles en amoníaco líquido, a pesar de su elevada carga. Ello abre la puerta a combinarlos con metales de transición para lograr agrupaciones intermetaloides, lo que promete todo un abanico de nuevos materiales: un campo apasionante tanto para la química como para la electrónica.

PARA SABER MÁS

Salzartige verbindungen und intermetallische Phasen des Natriums in flüssigem Ammoniak. E. Zintl et al. en *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, vol. A154, págs. 1-46, 1931.

A guest-free germanium clathrate. A. M. Guloy et al. en *Nature*, vol. 443, pág. 320, 2006.

$[Pd_3Sn_8Bi_6]^{4-}$: A 14-vertex Sn/Bi cluster embedding a Pd_3 triangle. F. Lips et al. en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 133, págs. 14.168-14.171, 2011.

Zintl-Ionen, Käfigverbindungen und intermetalloide Cluster der Elemente der 14. und 15. Gruppe. S. Scharfe et al. en *Angewandte Chemie*, vol. 123, págs. 3712-3754, 2011.

A bronze matryoshka: The discrete intermetalloid cluster $[Sn@Cu_{12}@Sn_{20}]^{12-}$ in the ternary phases $A_{12}Cu_{12}Sn_{21}$ (A=Na, K). S. Stegmaier et al. en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 133, págs. 19758–19768, 2011.

Doped semi-metal clusters: Ternary, intermetalloid anions $[Ln@Sn_7Bi_7]^{4-}$ and $[Ln@Sn_4Bi_9]^{4-}$ (Ln = La, Ce) with adjustable magnetic properties. F. Lips et al. en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 134, págs. 1181-1191, 2012.

VISITA NUESTRA WEB

www.investigacionyciencia.es



FUENTE DE INFORMACIÓN DE REFERENCIA
Más de 10.000 artículos elaborados por científicos expertos.

ORGANIZACIÓN TEMÁTICA
Consulta todos los contenidos de la página web organizados por materias científicas.

BUSCADOR REFINADO
Obtén resultados más precisos con los filtros de búsqueda avanzada.

HEMEROTECA DIGITAL
Accede a todas nuestras revistas digitalizadas en pdf.

ARTÍCULOS INDIVIDUALES
Adquiere por separado los artículos que más te interesen.

ACTUALIDAD CIENTÍFICA
Reseñas de trabajos científicos actuales elaboradas por nuestro equipo editorial.

SCILOGS
La mayor red de blogs de investigadores científicos.

SUSCRIPCIONES A LA CARTA
Accede a todas nuestras publicaciones en el formato que te resulte más cómodo (papel, digital o ambos).

BOLETINES TEMÁTICOS
Recibe gratis selecciones periódicas de todos nuestros contenidos sobre una materia determinada: medicina y salud, energía y medioambiente, astronomía...

REDES SOCIALES
Comparte nuestros contenidos en Facebook, Twitter y Google+.

SINDICACIÓN DE CONTENIDOS
Artículos, noticias, blogs...

HISTORIA DE LA CIENCIA

EL CASO CONTRA COPÉRNICO



La oposición a la revolucionaria idea de que la Tierra gira alrededor del Sol no provino solo de las autoridades religiosas. Los datos disponibles en aquella época apoyaban una cosmología diferente

Dennis Danielson y Christopher M. Graney

EN SÍNTESIS

Al proponer que la Tierra giraba alrededor del Sol, Copérnico desafió el saber científico y religioso acumulado durante más de un milenio.

La mayoría de los sabios de la época rechazaron sus teorías durante décadas, incluso después de que Galileo realizase sus históricas observaciones con el telescopio.

Las objeciones al modelo copernicano no eran solo teológicas. Los indicios observacionales favorecían una cosmología competidora: el «geoheliocentrismo» de Tycho Brahe.



ILUSTRACIONES DE KIRK CALDWELL

Dennis Danielson, profesor de inglés en la Universidad de la Columbia Británica, estudia el significado cultural de la revolución copernicana. En fecha reciente ha sido investigador visitante de historia de la ciencia en la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich.

Christopher M. Graney enseña física y astronomía en la Escuela Técnica Jefferson de Louisville, en Kentucky. Es traductor de textos astronómicos latinos del siglo XVII.

EN 2011, un equipo del CERN envió un haz de neutrinos desde Ginebra hasta el Laboratorio Nacional de Gran Sasso, en Italia, situado a 730 kilómetros de distancia. Al cronometrar el viaje, los investigadores del centro italiano observaron que, de algún modo, las partículas parecían haber sobrepasado la velocidad de la luz en el vacío. ¿Cómo respondió la comunidad científica?

En lugar de dar la espalda a la teoría de la relatividad de Einstein, muy bien establecida y según la cual nada puede viajar más rápido que la luz, la gran mayoría supuso que lo más probable era que todo se debiese a algún error en las mediciones. Meses más tarde, se comprobó que así había ocurrido.

Ahora imaginémonos dentro de cuatro siglos, en un futuro en el que las ideas de Einstein han sido superadas y en el que se ha demostrado que, en efecto, los neutrinos pueden viajar más rápido que la luz. ¿Cómo interpretaríamos la reticencia de los científicos actuales a aceptar las pruebas al respecto? ¿Concluiríamos que los físicos del siglo XXI estaban demasiado apegados a sus creencias? ¿Que, motivados por consideraciones acientíficas, no eran más que un montón de einsteinianos testarudos, aferrados a una idea por tradición y autoridad?

Queremos creer que los científicos de hoy recibirían un tratamiento más justo. A fin de cuentas, su reserva a abandonar ideas de apariencia sólida —por más que estas siempre puedan demostrarse falsas— se funda en razones científicas, no en meros prejuicios.

Tales episodios no han sido inusuales en la historia de la ciencia. Los astrónomos del siglo XIX creían que la Vía Láctea constituía todo el universo, por lo que, al examinar las primeras imágenes de Andrómeda, creyeron que se trataba de una estrella rodeada por un sistema planetario incipiente —y no, como sabemos hoy, de una galaxia formada por quizás un billón de estrellas—. Einstein creía que el universo era estático, lo que le llevó a introducir una constante cosmológica en las ecuaciones de la relatividad general para mantenerlo inmóvil. Ambas suposiciones eran razonables... e incorrectas. Como desde estas mismas páginas han argumentado David Kaiser, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Angela N. H. Creager, de la Universidad de Princeton, es posible estar equivocado y, al mismo tiempo, ser muy productivo [*véase* «Errores fecundos», por David Kaiser y Angela N. H. Creager; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2012]. A posteriori, todo se ve siempre más claro.

En el caso de los neutrinos superveloces no gozamos de tanta perspectiva. Pero una historia famosa cuyo final sí conocemos es la de Nicolás Copérnico y su teoría heliocéntrica: la suposición de que la Tierra rota en torno a su eje con un período de un día, al tiempo que orbita alrededor del Sol con periodicidad anual. El modelo copernicano plantaba cara a la vieja creencia, plasmada desde el siglo II en el *Almagesto* de Ptolomeo, de que la Luna, el Sol y las estrellas giraban en torno a una Tierra inmóvil situada en el centro del universo.

Copérnico propuso sus revolucionarias ideas en su obra *De revolutionibus orbium coelestium,* de 1543, que numerosos eruditos de la época leyeron, admiraron, anotaron y usaron para mejorar sus previsiones astronómicas. Pero, aún en 1600, 57 años más tarde, no más de una docena de astrónomos competentes había abandonado la creencia de una Tierra inmóvil. La mayoría seguía prefiriendo el geocentrismo, más ajustado al sentido común. Incluso nosotros parecemos seguir respaldándolo cuando, por ejemplo, hablamos de la salida o la puesta del sol.

En ocasiones se ha defendido que este atolladero cosmológico se prolongó como consecuencia de los prejuicios imperantes en la época y que solo se desatascó en 1609, cuando Galileo observó la Luna,

los planetas y las estrellas con el telescopio. Ninguna de las dos afirmaciones es cierta. Aun bien entrado el siglo xvii, los astrónomos seguían contando con buenas razones científicas para dudar de la teoría copernicana. Su historia constituye un ejemplo muy revelador de hasta qué punto los investigadores pueden tener motivos de peso para oponerse a ideas revolucionarias; también a aquellas que, a la postre, puedan mostrarse espectacularmente correctas.

EL MODELO DE TYCHO BRAHE

Una de las principales objeciones a la hipótesis copernicana provino de Tycho Brahe, astrónomo danés que, en 1588, propuso su propio modelo. Su teoría «geoheliocéntrica» contaba con dos grandes ventajas: cuadraba con las más profundas intuiciones sobre cómo parecía comportarse el mundo y se ajustaba a los datos disponibles mejor que el modelo copernicano.

Brahe era un científico sobresaliente. Dirigía un inmenso programa de investigación para el que contaba con un observatorio como un castillo, un presupuesto que podríamos equiparar al de la NASA y los mejores instrumentos y asistentes que el dinero podía comprar. Fueron sus datos sobre Marte los que Johannes Kepler, ayudante de Brahe, empleó para deducir la naturaleza elíptica de los movimientos planetarios. Owen Gingerich, historiador de Harvard, suele ilustrar la relevancia del astrónomo danés a partir del trabajo de Albert Curtz, erudito que en el siglo xvii recopiló todos los datos astronómicos reunidos desde la Antigüedad: en dos milenios, la mayor parte de ellos procedía de Brahe.

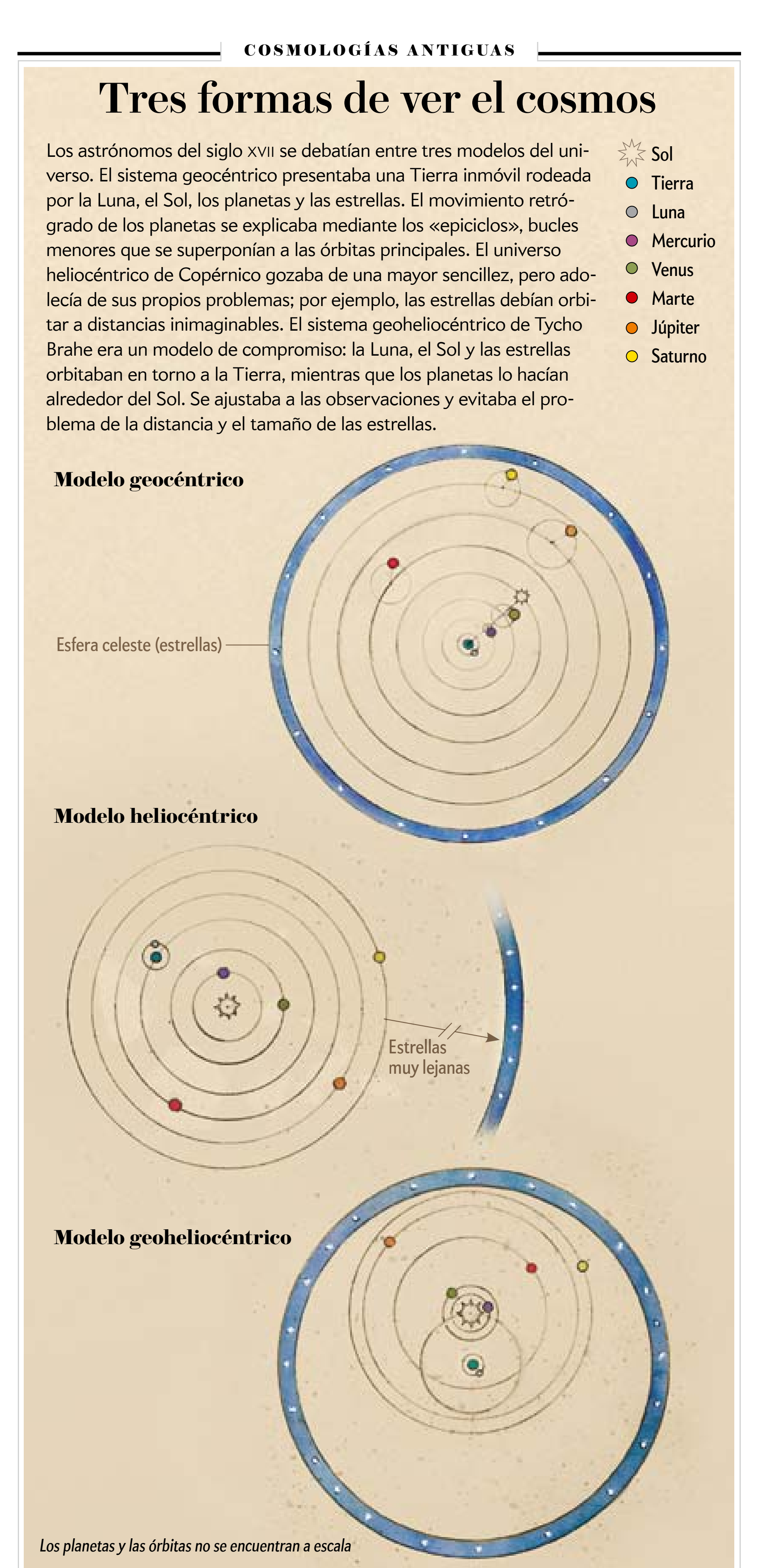
El consumado astrónomo había quedado impresionado por la elegancia del modelo copernicano. Sin embargo, había ciertos aspectos que no le agradaban. Uno de ellos era la falta de una causa física que explicase el movimiento de la Tierra (Brahe vivió más de un siglo antes de que la física newtoniana aportase tal explicación). El tamaño de nuestro planeta se conocía por entonces bastante bien, y el peso de una esfera de roca y polvo de miles de kilómetros de diámetro solo podía ser descomunal. Si ya resultaba difícil tirar de un carro cargado por la calle, ¿qué podía propulsar un cuerpo como la Tierra alrededor del Sol?

El hecho de que las estrellas y los planetas sí se moviesen resultaba más sencillo de explicar. Desde Aristóteles, se pensaba que los cuerpos celestes estaban formados por una sustancia etérea

COSMOLOGÍAS ANTIGUAS

Tres formas de ver el cosmos

Los astrónomos del siglo xvii se debatían entre tres modelos del universo. El sistema geocéntrico presentaba una Tierra inmóvil rodeada por la Luna, el Sol, los planetas y las estrellas. El movimiento retrógrado de los planetas se explicaba mediante los «epiciclos», bucles menores que se superponían a las órbitas principales. El universo heliocéntrico de Copérnico gozaba de una mayor sencillez, pero adolecía de sus propios problemas; por ejemplo, las estrellas debían orbitar a distancias inimaginables. El sistema geoheliocéntrico de Tycho Brahe era un modelo de compromiso: la Luna, el Sol y las estrellas orbitaban en torno a la Tierra, mientras que los planetas lo hacían alrededor del Sol. Se ajustaba a las observaciones y evitaba el problema de la distancia y el tamaño de las estrellas.

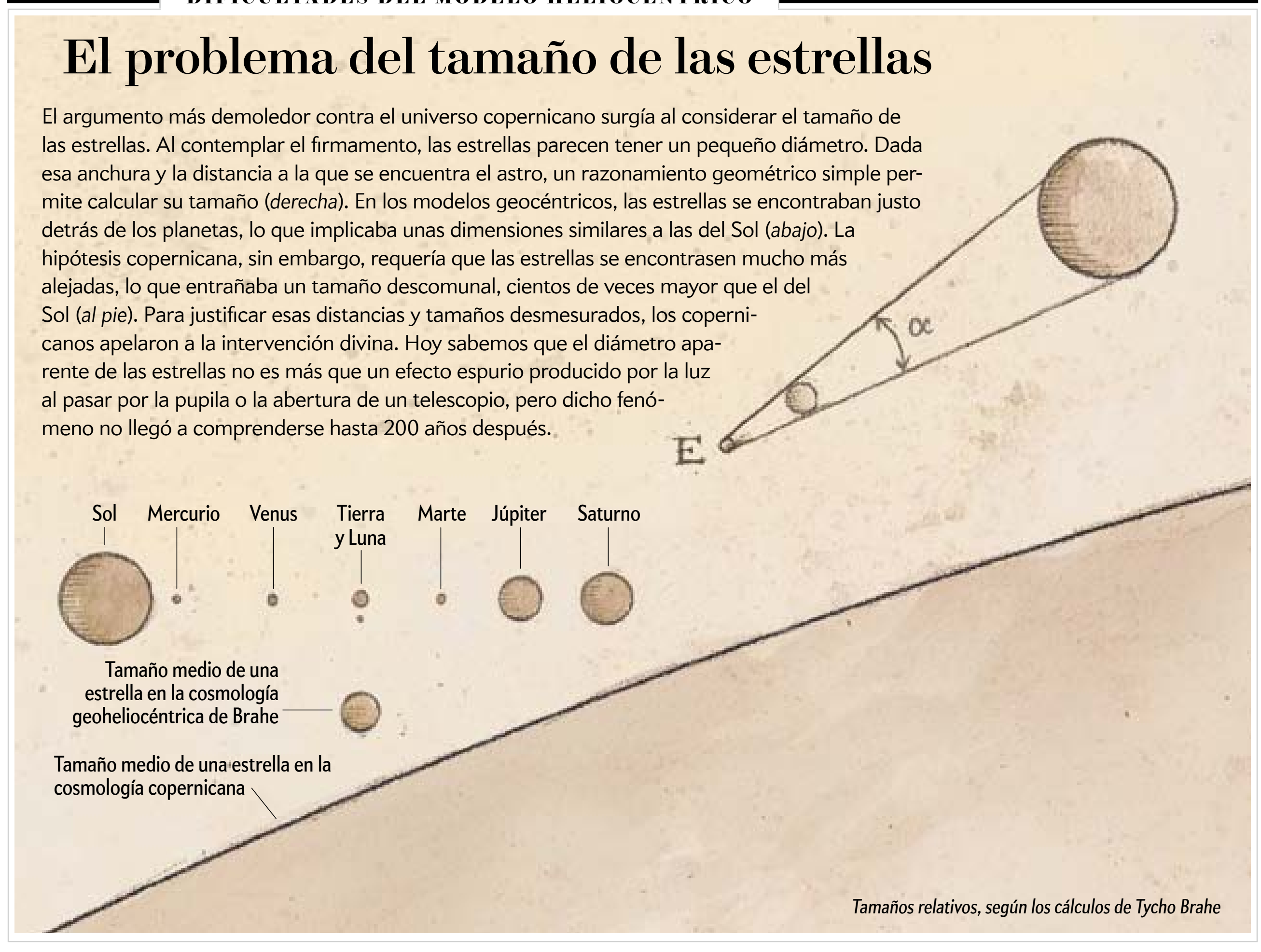


Los planetas y las órbitas no se encuentran a escala

DIFICULTADES DEL MODELO HELIOCÉNTRICO

El problema del tamaño de las estrellas

El argumento más demoledor contra el universo copernicano surgía al considerar el tamaño de las estrellas. Al contemplar el firmamento, las estrellas parecen tener un pequeño diámetro. Dada esa anchura y la distancia a la que se encuentra el astro, un razonamiento geométrico simple permite calcular su tamaño (*derecha*). En los modelos geocéntricos, las estrellas se encontraban justo detrás de los planetas, lo que implicaba unas dimensiones similares a las del Sol (*abajo*). La hipótesis copernicana, sin embargo, requería que las estrellas se encontrasen mucho más alejadas, lo que entrañaba un tamaño descomunal, cientos de veces mayor que el del Sol (*al pie*). Para justificar esas distancias y tamaños desmesurados, los copernicanos apelaron a la intervención divina. Hoy sabemos que el diámetro aparente de las estrellas no es más que un efecto espurio producido por la luz al pasar por la pupila o la abertura de un telescopio, pero dicho fenómeno no llegó a comprenderse hasta 200 años después.



Tamaños relativos, según los cálculos de Tycho Brahe

especial e inexistente en la Tierra, la cual presentaba una tendencia natural a moverse en círculos. Según Brahe, el modelo copernicano evitaba «de manera experta y completa todo aquello superfluo o discordante en el sistema de Ptolomeo». Sin embargo, adscribía a la Tierra, «ese cuerpo gigantesco, perezoso y poco apto para el movimiento, un avance tan veloz como el de los faros etéreos». En cierto modo, los antiguos astrónomos no se diferenciaban tanto de los actuales, quienes postulan que la mayor parte del universo se compone de materia y energía oscuras: sustancias igualmente misteriosas y diferentes de todo lo que conocemos.

Otro aspecto que incomodaba a Brahe eran las estrellas del modelo copernicano. Ptolomeo había concluido que la esfera de las estrellas debía tener «una extensión inconmensurable», ya que nadie había logrado observar la paralaje diurna; es decir, alteraciones apreciables en el aspecto o posición de las estrellas al observarlas desde ángulos y distancias diferentes sobre la superficie terrestre, o a medida que aparecen por el horizonte y cruzan el cielo hasta desaparecer de nuevo. Ello implicaba que, en comparación con las distancias estelares, el diámetro de la Tierra resultaba insignificante; la Tierra es «como un punto», escribió Ptolomeo.

Copérnico sabía, sin embargo, que tampoco nadie había detectado la paralaje anual: cambios en la posición relativa de las estrellas causados por el movimiento de la Tierra a lo largo de su órbita. Si nuestro planeta de veras giraba alrededor del Sol, la ausencia de paralaje anual implicaba que el diámetro de dicha órbita (al que Copérnico llamó *orbis magnus*) también debía ser insignificante, «puntual», comparado con la distancia a las estrellas. La «extensión inconmensurable» del universo adquiría así proporciones grotescas, casi imposibles de creer.

Pero, además, la hipótesis copernicana entrañaba importantes consecuencias para el tamaño de las estrellas. Al contemplar el cielo nocturno, las estrellas parecen exhibir un diámetro fijo. Tanto Ptolomeo como Brahe midieron esa anchura aparente. Hoy sabemos que, a todos los efectos, las estrellas lejanas constituyen fuentes de luz puntuales, y que esa extensión aparente no es más que un efecto espurio provocado por las ondas de luz al atravesar una abertura circular, como la de un telescopio o la del iris. Pero los astrónomos de aquella época desconocían la naturaleza ondulatoria de la luz.

A partir de cálculos geométricos elementales, Brahe dedujo que, si las estrellas se encontraban a distancias copernicanas, su diámetro debía ser equiparable al del *orbis magnus*. Incluso la más diminuta de las estrellas parecería descomunal al lado del Sol, del mismo modo que un pomelo resulta enorme en comparación con el punto final de esta frase. Algo así se antojaba difícil de creer, por lo que Brahe llegó a la conclusión de que tales estrellas titánicas eran absurdas. En palabras del historiador Albert Van Helden, de la Universidad Rice: «La lógica de Brahe era impecable, y sus medidas, irreprochables. Un copernicano no tenía otra opción que aceptar sus argumentos».

Ante la contundencia de las pruebas científicas en contra, los copernicanos se vieron obligados a apelar a la omnipoten-

cia divina para defender su teoría: «Eso que los temperamentos vulgares juzgan a primera vista absurdo no puede ser tachado tan fácilmente de disparate, pues la Sapiencia y Majestad divinas son mucho mayores de lo que creen», escribía el copernicano Christoph Rothmann en una carta a Brahe. «Conceded a la inmensidad del universo y al tamaño de las estrellas la enormidad de la que gustéis: nada de ello guardará nunca proporción alguna con el infinito Creador. Cuanto mayor sea el rey, más vasto y grandioso habrá de ser el palacio que dé cabida a su majestuosidad. ¿Y cuán grandioso consideráis que tendría que ser un palacio digno de DIOS?»

Impasible ante argumentos de ese estilo, Brahe propuso su propio modelo. En él, el Sol, la Luna y las estrellas orbitaban en torno a una Tierra inmóvil, al igual que en el sistema ptolemaico, mientras que los planetas lo hacían alrededor del Sol, como en el copernicano. Dicho modelo conservaba las ventajas del geocentrismo, ya que no necesitaba explicar el movimiento de la gigantesca y perezosa Tierra. El problema derivado de la ausencia de paralaje anual también desaparecía, lo que evitaba la necesidad de postular estrellas tan remotas y descomunales; en el modelo de Brahe, estas se situaban justo después de los planetas y su tamaño resultaba razonable. Por último, en lo que se refería a los planetas, los sistemas de Brahe y Copérnico eran matemáticamente idénticos, por lo que el primero conservaba la elegancia copernicana que, para Brahe, evitaba todo lo «superfluo y discordante» del sistema ptolemaico.

Cuando Galileo comenzó a escudriñar el cielo con su telescopio, llevó a cabo varios descubrimientos que contradecían la cosmología de Ptolomeo. Júpiter tenía lunas, lo que demostraba que el universo podía albergar más de un centro de movimiento. También observó las fases de Venus, lo que implicaba que el planeta giraba alrededor del Sol. Sin embargo, tales hallazgos no se interpretaron como una prueba de que la Tierra orbitase en torno al Sol, ya que eran del todo compatibles con el modelo de Brahe.

UN DEBATE DE 200 AÑOS

A mediados del siglo XVII, bastante tiempo después de la muerte de Copérnico, Brahe y Galileo, el astrónomo italiano Giovanni Battista Riccioli publicó una recopilación enciclopédica de los diferentes sistemas cosmológicos a la que, en honor a la obra magna de Ptolomeo, denominó *Almagestum novum*. En ella sopesó todo tipo de argumentos astronómicos, físicos y religiosos a favor y en contra del modelo copernicano. Había dos que, sin embargo, el autor juzgaba definitivos en contra de Copérnico. Ambos se fundamentaban en un razonamiento científico, ambos enraizaban en las ideas de Brahe y ninguno de ellos fue rebatido de manera contundente hasta cientos de años después.

El primero se basaba en la imposibilidad de detectar ciertos efectos que, para Riccioli, un planeta en rotación debería inducir sobre el movimiento de proyectiles y cuerpos en caída libre. Ya Brahe había considerado que una Tierra en rotación tendría que alterar la trayectoria de los proyectiles. Esos efectos, sin embargo, no se observaron hasta el siglo XIX, cuando el francés Gaspard-Gustave de Coriolis desarrolló una descripción matemática completa del fenómeno.

La segunda gran objeción versaba una vez más sobre el tamaño de las estrellas. Brahe había trabajado sin telescopio, por lo que Riccioli actualizó las observaciones del danés con ayuda de dicho instrumento. Tras diseñar un procedimiento reproducible para medir el diámetro de los astros, comprobó que las estrellas parecían ser menores de lo que había calculado Brahe. Sin embargo, el telescopio también aumentaba la sensibilidad a la paralaje anual, que continuaba sin observarse; por tanto, las estrellas debían situarse más lejos de lo supuesto por el danés. El efecto neto era que las estrellas debían seguir teniendo exactamente el mismo tamaño que les había asignado Brahe.

Riccioli protestó contra la apelación de los copernicanos a la omnipotencia divina para eludir aquel problema científico. Como sacerdote jesuita, Riccioli no ponía en duda el poder de Dios, pero rechazaba esa manera de argumentar: «Aun cuando semejante falacia resulte imposible de refutar, nunca podrá satisfacer a los hombres más prudentes».

Así pues, la reticencia a aceptar las ideas de Copérnico fue provocada por la falta de pruebas científicas sólidas que apoyasen sus teorías. En 1674 Robert Hooke, responsable de los experimentos que se llevaban a cabo en la Real Sociedad británica, admitía: «Si la Tierra se mueve o se halla en reposo ha sido un problema que, desde que Copérnico lo resucitara, ha ejercitado el ingenio de nuestros mejores astrónomos y filósofos; no obstante, no ha habido ninguno que haya descubierto una manifestación cierta de lo uno ni de lo otro».

En la época de Hooke, una mayoría creciente de científicos aceptaba el copernicanismo, si bien hasta cierto punto lo hacían a pesar de sus dificultades científicas. Nadie logró efectuar una medida convincente de la paralaje anual hasta 1838, año en que lo logró Friedrich Bessel. Hacia la misma época, George Airy formuló una explicación teórica completa de por qué las estrellas en el firmamento parecían mayores de lo que en realidad eran, y Ferdinand Reich detectó por vez primera el efecto de rotación terrestre sobre los cuerpos en caída libre. Y, por supuesto, hacía tiempo que la física de Newton —que no funcionaba con el modelo de Brahe— podía explicar el movimiento de la «gigantesca y perezosa» Tierra.

Sin embargo, quienes se opusieron al copernicanismo en tiempos de Galileo y Riccioli tenían de su lado a una ciencia respetable, coherente y basada en la observación. Estaban equivocados, pero eso no los convierte en malos científicos. No en vano, lanzarse a refutar de manera rigurosa los argumentos ajenos siempre ha sido parte del reto —y de la gracia— del quehacer científico.

PARA SABER MÁS

Copernicus and Tycho. Owen Gingerich en *Scientific American*, diciembre de 1973.
Measuring the universe: Cosmic dimensions from Aristarchus to Halley. Albert Van Helden. University of Chicago Press, 1985.
The telescope against Copernicus: Star observations by Riccioli supporting a geocentric universe. Christopher M. Graney en *Journal for the History of Astronomy*, vol. 41, n.º 4, págs. 453-467, noviembre de 2010.
Ancestors of Apollo. Dennis Danielson en *American Scientist*, vol. 99, n.º 1, págs. 136-143, marzo-abril de 2011.
Stars as the armies of God: Lansbergen's incorporation of Tycho Brahe's star-size argument into the Copernican theory. Christopher M. Graney en *Journal for the History of Astronomy*, vol. 44, n.º 2, págs. 165-172, mayo de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

El caso Galileo. Owen Gingerich en *IyC*, octubre de 1982.
Galileo y el fantasma de Bruno. Lawrence S. Lerner y Edward A. Gosselin, enero de 1987 y en *Galileo y su legado*, colección *Temas* de *IyC* n.º 58, 2009.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Etiquetas electrónicas

Las etiquetas de identificación por radiofrecuencia permiten detectar a distancia objetos y personas. Su funcionamiento puede entenderse a partir de las leyes del electromagnetismo clásico

Los miembros más exclusivos del antiguo Baja Beach Club de Barcelona no necesitaban identificarse a la entrada ni mostrar su tarjeta de crédito: un microchip electrónico del tamaño de un grano de arroz, insertado bajo la piel, permitía reconocerlos. Dignos de una novela de ciencia ficción, estos dispositivos reciben el nombre de etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés). Aunque su desarrollo ha sido posible gracias a la miniaturización de los componentes electrónicos, su polivalencia y funcionamiento se basan en algunas leyes simples del electromagnetismo.

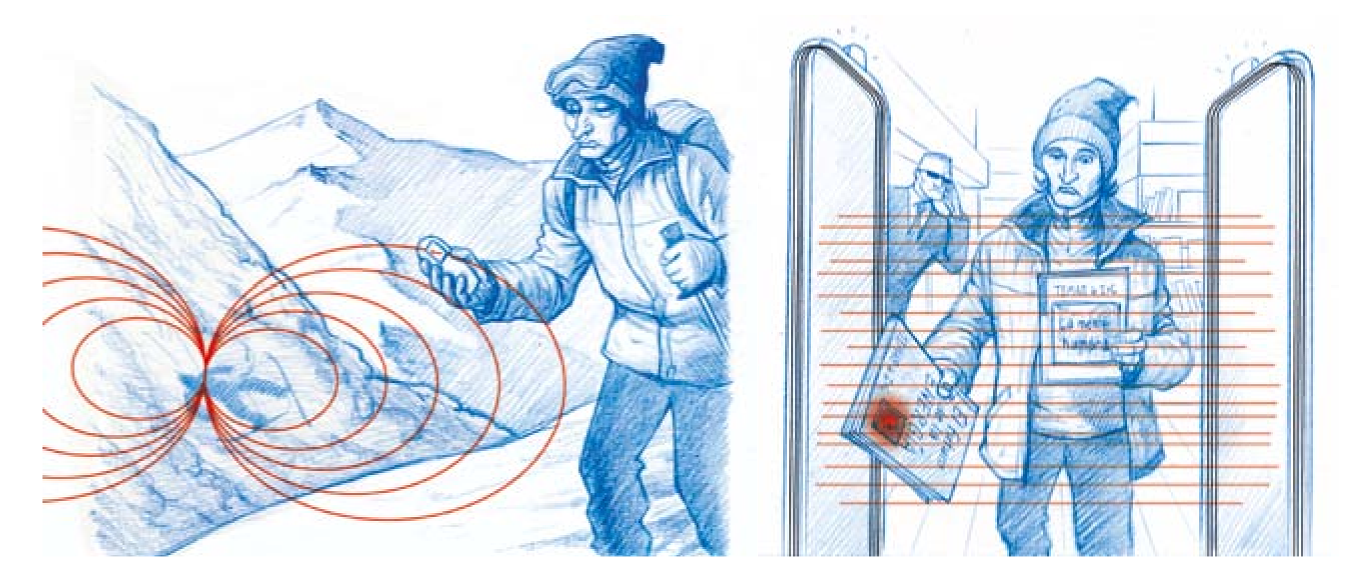
Todos velamos por nuestra intimidad. Sin embargo, hay situaciones en las que podemos llegar a desear muy vivamente que nos localicen. Por ejemplo, si hemos sido víctimas de un alud de nieve y estamos esperando a que nos rescaten. A tal efecto existen los dispositivos ARVA, o aparatos de rescate de víctimas de un alud. Se trata de balizas que emiten y detectan señales de radiofrecuencia de 457 kilohercios. Si todos los miembros de un grupo de esquiadores llevan uno, el rescate en caso de accidente se verá muy facilitado.

A pesar de sus ventajas, el uso de tales dispositivos presenta también algunos inconvenientes. Su señal apenas alcanza unas decenas de metros; es decir, mucho menos que la longitud de onda de la radiación, de 656 metros. Cuando detector y emisor se encuentran a dicha distancia, decimos que el primero se halla en la zona de «campo cercano», en la que el campo electromagnético creado por el segundo se asemeja al campo magnético de un imán cuya polaridad oscila de manera periódica. Las líneas de campo forman bucles en torno a la antena emisora. La dirección que indica el dispositivo ARVA sigue esos bucles, por lo que no apunta directamente hacia la víctima. Por ello, localizar accidentados con un ARVA exige cierta experiencia. Además, estos aparatos necesitan su propia batería, son relativamente pesados (unos 300 gramos) y requieren mantenimiento.

Balizas sin alimentación

¿Y si también el proceso de detección quedase a cargo de los equipos de rescate? Ello permitiría a los montañeros portar balizas que no necesitasen baterías, más ligeras y económicas. Pero ¿cómo alimentar entonces el aparato? La respuesta es sencilla: a partir de la radiación emitida por el dispositivo de los socorristas.

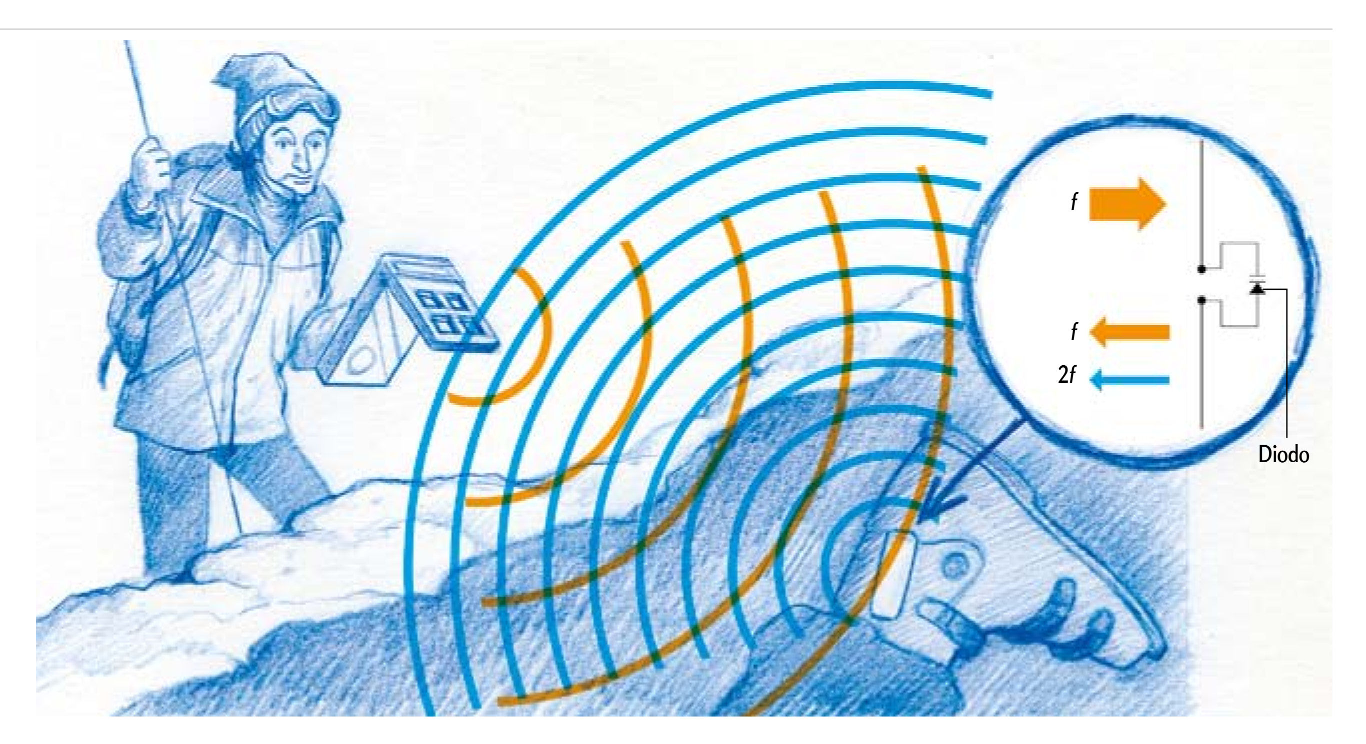
El fundamento de estos equipos es el mismo que el de las etiquetas antirrobo comerciales. En el arco que se encuentra



LOS EMISORES ARVA, empleados para localizar a las víctimas de un alud, crean un campo magnético alterno (*rojo*) que se propaga unas decenas de metros. Dicha radiación es detectada por otro aparato ARVA, el cual revela la dirección de las líneas de campo. Aunque no señala directamente a la víctima, ayuda a localizarla.

LAS ETIQUETAS ANTIRROBO incorporan un pequeño circuito que no necesita alimentación eléctrica. Las bobinas del arco detector (*negro*) generan un campo magnético alterno (*líneas rojas*) que induce una corriente eléctrica en el circuito de la etiqueta. La energía así extraída del arco detector modifica la corriente que circula por él, y es ese cambio lo que se detecta.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO



EN LOS DISPOSITIVOS RECCO, **únicamente el socorrista dispone de un emisor con fuente de alimentación. El esquiador solo lleva un pequeño circuito pasivo que entra en resonancia cuando recibe las ondas del emisor (*naranja*). Al activarse, estas etiquetas electrónicas emiten radiación (*azul*). Gracias a un diodo integrado en el circuito, una de las componentes principales de dicha radiación oscila al doble de frecuencia que la señal excitadora (*f*). Esa diferencia entre una y otra facilita la detección.**

a la entrada de un establecimiento, unas bobinas generan un campo magnético alterno con una frecuencia de algunos megahercios. La etiqueta —una placa de pocos centímetros cuadrados— lleva una cinta conductora con forma de espiral. Tal como descubriera Michael Faraday en 1831, las variaciones de un campo magnético externo inducirán en ella una corriente eléctrica alterna. Así pues, y al igual que ocurre en un transformador, un circuito primario (el del arco detector) alimenta al secundario (la etiqueta).

De esa manera, la etiqueta se detecta gracias a la energía que absorbe del campo emitido por el arco. Pero ¿cómo distinguirla de llaves, relojes, joyas u otros materiales conductores que se comporten de modo similar? A tal fin, al circuito de la etiqueta se le añade un condensador. Eso lo convierte en un circuito oscilante que entra en resonancia cuando es excitado a la frecuencia debida. Basta entonces con dotar al campo magnético del arco de una frecuencia de barrido centrada en la del oscilador. Así, mientras que las perturbaciones parásitas dependerán poco o nada de la frecuencia de excitación, la etiqueta se activará únicamente a la frecuencia de resonancia, con lo que dejará una firma eléctrica en la corriente del arco.

Para lograr una identificación más precisa, en la etiqueta puede incluirse un microchip portador de datos numéricos. La energía eléctrica necesaria para su funcionamiento procede una vez más de la corriente inducida en el circuito de la etiqueta. Al modular la corriente del circuito, el microchip permite transmitir datos al detector. Las tarjetas que desde hace unos años emplean algunos sistemas públicos de transporte siguen este principio. El Navigo parisino, por ejemplo, usa una frecuencia de 13,56 megahercios para identificar el abono del usuario y validar el trayecto.

Teledetección a alta frecuencia

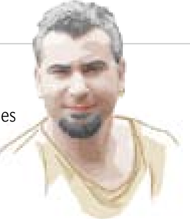
Sin embargo, para detectar objetos más distantes y poder además transmitir datos hacen falta frecuencias más elevadas. Con frecuencias de varios gigahercios, la longitud de onda de la radiación asciende a unas decenas de centímetros. Cuando la distancia a la antena emisora rebasa el metro, el campo emitido se asemeja a una onda cuya amplitud varía en proporción inversa a la distancia. Esta disminución, mucho más suave que la que tiene lugar a bajas frecuencias (en cuyo caso la señal decrece como el cubo de la distancia), augura un alcance mayor. En ese régimen, sin embargo, el campo emitido por la antena se comporta como una onda libre, por lo que —al contrario de lo que ocurre con los arcos antirrobo— su absorción por la etiqueta no se traducirá en efecto alguno sobre la antena.

¿Cómo detectar entonces el campo emitido por la etiqueta? La dificultad radica en que este es mucho más débil que el campo excitador. Por ello, hace falta recurrir a un último truco: insertar un diodo en el circuito de la etiqueta. Este componente electrónico rectifica la corriente; es decir, suprime las alternancias negativas. Así pues, el campo radiado por la etiqueta ya no quedará descrito por una señal sinusoidal de frecuencia igual a la de emisión, sino por una en la que una de las componentes principales oscilará a una frecuencia doble. Dicha componente, completamente distinta de la señal excitadora, puede detectarse con facilidad.

Así es como funcionan los dispositivos RECCO para la detección de víctimas de un alud. La etiqueta electrónica, excitada a una frecuencia de 0,917 gigahercios, reenvía una señal de 1,834 gigahercios. Al ser pasivos (sin baterías internas), presentan un tamaño muy reducido y pueden integrarse sin problemas en el equipo o la ropa del esquiador. El conjunto excitador-detector, en cambio, debe alcanzar la potencia y sensibilidad necesarias, por lo que reviste mayores dimensiones que una baliza ARVA (su peso asciende a unos 1,6 kilogramos). Aunque hoy por hoy prestan servicio en numerosas estaciones de esquí, los profesionales de montaña recomiendan usarlos junto con dispositivos ARVA en aras de una mayor seguridad.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



El retrato de Luca Pacioli

Misterios y mensajes ocultos en el cuadro más estudiado por los historiadores de la matemática

El *Retrato del fraile Luca Pacioli con un discípulo*, que se conserva en el Museo y Galería Nacional de Capodimonte, en Nápoles, es el cuadro más reproducido en los libros de historia de la matemática. Pintado entre mediados y finales de la década de 1490, se trata del primer retrato conocido de un matemático de prestigio. Sin embargo, y a pesar de los esfuerzos de los investigadores, tanto el propósito de la obra como la identidad del pintor y del joven que acompaña a Pacioli siguen generando controversia.

La hipótesis más fabulosa apunta a que su autor fue Leonardo da Vinci y que el misterioso acompañante sería Alberto Durero. De ser así, nos encontraríamos ante un icono del Renacimiento de la talla del *Hombre de Vitruvio* o *Melancolía I*: una instantánea de un momento sublime en la historia del arte y la matemática.

El matemático Luca Pacioli, o Luca di Borgo (c. 1445-1517), aparece en el cuadro ataviado con un hábito de fraile franciscano. Con su mano derecha señala una construcción geométrica en un pizarrín, en cuyo canto podemos leer «EUCLIDES». Su mano izquierda se posa sobre un tomo abierto que, según los expertos, sería una copia del libro XIII de los *Elementos*, dedicado a los sólidos platónicos. En concreto, la construcción geométrica en la que parece trabajar Pacioli aparece en las proposiciones 8 y 12.

A la derecha aparece otro volumen en el que figuran las iniciales «LI R LVC BVR»; es decir, *Liber reverendi Lucae Burgensis,* por lo que se sospecha que se trata de su célebre *Summa de arithmetica, geometria, proportioni et proportionalità*, impresa por primera vez en Venecia en 1494.

Summa de arithmetica

La *Summa* de Pacioli fue el primer texto europeo que utilizó el cero adecuadamente. En la Europa medieval, la palabra *cifra* se usaba para designar tanto el cero como el sistema de numeración indoarábigo. Dado que en sus comienzos se usaba en secreto, adquirió también el significado de «código secreto», o «cifrado».

¿Por qué en secreto? En la Edad Media, los numerales indoarábigos fueron demonizados por la Iglesia, interesada en mantener la aritmética como un instrumento para la élite y recelosa de su origen islámico. La batalla entre abacistas (los usuarios del ábaco y los números romanos) y algoristas (los partidarios del sistema de numeración árabe) duró siglos. Al final, la presión de mercaderes y contables propició, junto con la aparición de la imprenta, la implantación del hereje «código secreto».

En su retrato, Pacioli celebra de modo sutil el resultado de la batalla. En el cuadro, donde aparecen una esponja, un compás, una tiza y un transportador de ángulos, no puede verse ningún ábaco. Pero sí, escrita en el pizarrín de manera casi imperceptible, la suma de tres números en notación indoarábiga (inapreciables en la imagen reproducida aquí).

Summa fue una enciclopedia del conocimiento matemático de la época, un compendio total de la matemática que los árabes habían introducido en la península ibérica y que había alcanzado Europa por ósmosis comercial con el mundo musulmán. La obra gozó de una gran popularidad y convirtió a Pacioli en una celebridad en vida. Fue elogiada por la generación posterior de matemáticos renacentistas, como Tartaglia, Cardano o Bombelli, y ello a pesar de que no contenía muchas más matemáticas que el *Liber abaci* de Fibonacci, escrito casi 300 años atrás. De hecho, incluía un buen número de errores, como el propio Cardano se ocupó de dejar claro al dedicarle un capítulo entero en su *Arithmetica* de 1539.

¿A qué se debió entonces su popularidad? Una parte se explica gracias al acierto de escribirla en lengua vernácula y a que, probablemente, se tratase de la primera enciclopedia matemática impresa (la primera obra matemática impresa de la que se tiene constancia es la anónima *Aritmética de Treviso*, de 1478).

Pero, además, *Summa* supuso uno de los primeros intentos de transformar el álgebra retórica en sincopada; es decir, en usar abreviaturas y relaciones sintácticas para las operaciones matemáticas. Ese estadio no se superaría hasta más de un siglo después, con la llegada del álgebra simbólica de François Viète (1540-1603). Con todo, en honor a la verdad, hemos de decir que un manuscrito de la época, *Triparty*, publicado en 1484 por el parisino Nicolas Chuquet, empleaba una notación superior. De haberse impreso, su divulgación habría acelerado el desarrollo de un simbolismo algebraico moderno.

Otro mérito de *Summa* fue la inclusión de un tratado sobre procedimientos mercantiles, algo quizá chocante hoy en día, pero corriente en una época en que la aritmética mercantil era desarrollada y enseñada por matemáticos.

En su libro, Pacioli describe por primera vez el método de doble entrada, por lo que es considerado el padre de la contabilidad moderna. Un honor tal vez exagerado, pues la Venecia de Pacioli era el centro comercial europeo de distribución de productos orientales, y el método de doble entrada era de uso común entre sus mercaderes (de hecho, se conocía como «método veneciano»); aunque puede que fuese importado de Alejandría o Constantinopla, pues hay constancia histórica de su uso en El Cairo en el siglo XI.

El rombicuboctaedro y *De divina*

Volviendo al cuadro, vemos que sobre *Summa* se apoya un dodecaedro de madera. Se trata del quinto sólido platónico, el que la teoría de los elementos asociaba con la «quinta esencia», o éter, la sustancia de la que estaban hechos los cielos.

A la izquierda, pendiendo de un hilo y como si se tratara de un tercer personaje, podemos apreciar el objeto más extraño del cuadro: un rombicuboctaedro de cristal, un sólido convexo delimitado por



ENCUENTRO SUBLIME: Retrato del matemático renacentista Luca Pacioli junto a un misterioso acompañante. Pintado a finales del siglo xv, su autoría y significado siguen suscitando debate.

18 cuadrados y 8 triángulos equiláteros. Se trata de uno de los trece sólidos semirregulares, aquellos de caras formadas por polígonos regulares y descritos por Arquímedes en un trabajo perdido. Estos fueron redescubriéndose a lo largo del Renacimiento hasta que, finalmente, Kepler los redefinió de manera sistemática en su *Harmonices mundi*, de 1619.

Parece ser que el rombicuboctaedro era una figura desconocida en el momento de la ejecución del cuadro, el cual aporta la primera representación gráfica de este sólido de la que hay constancia. La segunda aparece en la obra más famosa de Pacioli: *De divina proportione,* concluida en 1498 e impresa en 1509. Dedicada a la geometría, *De divina* tuvo mayor mérito y originalidad que *Summa*, aunque en su tiempo no gozó del mismo éxito y, al poco, cayó en el olvido.

Redescubierta siglos después, esta obra, cuyo protagonista es el número áureo, o «divina proporción», es por la que los matemáticos actuales conocen a Pacioli. Y también los estudiosos del arte, pues en ella aparecen por primera vez imágenes en perspectiva de los sólidos regulares y de numerosos poliedros derivados: unas preciosas ilustraciones de sólidos geométricos ejecutados por la mano (izquierda) de Leonardo da Vinci, que, parafraseando a Pacioli, habían permanecido «ocultos a la humanidad». Precisamente, el rombicuboctaedro aparece en las láminas xxxv y xxxvi de la obra.

Leonardo da Vinci

La tradición ha atribuido la autoría del cuadro al pintor Jacobo de Barbari (1440-1515). Pero, a poco que nos fijemos en la figura del joven, la cara de Pacioli y el rombicuboctaedro, habremos de reconocer que estos elementos muestran una factura muy superior al resto. En particular, las manos y el hábito de Pacioli resultan algo toscos comparados con el traje y el rostro del misterioso acompañante. Por ello, algunos expertos creen que el cuadro fue comenzado por un pintor de gran destreza y rematado por, al menos, un segundo artista de menor categoría. Es probable que este último fuera Barbari.

En 1496 Pacioli se trasladó a Milán, invitado a la corte de Ludovico Sforza. Fue allí donde entabló amistad con Leonardo da Vinci y donde le propuso realizar las sesenta ilustraciones que incluiría *De divina*. Tras la captura de Ludovico el Moro por los franceses, huyeron juntos y acabaron recalando en Florencia, donde compartieron casa.

La factura del rombicuboctaedro, que se encuentra semilleno de agua, parece estar más allá de la pericia de Barbari. La luz que entra desde la izquierda se refleja y se refracta y nos permite vislumbrar, hasta tres veces, la imagen del Palacio Ducal de Urbino.

Nos encontramos ante una pieza maestra de la perspectiva, la óptica y la cosmogonía medieval. El sólido, formado por caras cuadradas y triangulares, evoca con su geometría a los cuatro elementos de la cosmogonía del *Timeo* de Platón. Al mismo tiempo, en una doble alegoría, los elementos se ven representados por el agua y el aire que se hallan dentro del rombicuboctaedro, la tierra queda simbolizada por el cristal, y el fuego, por los reflejos de luz. Por todo ello, algunos estudiosos opinan que el rombicuboctaedro encarnaría a un tercer personaje: el único artista del momento capaz de pintarlo, Leonardo da Vinci.

El maestro y el estudiante

Desde la antigua Grecia, Euclides y Arquímedes han sido los arquetipos del maestro y el creador de matemáticas, respecti-



¿UN TERCER PERSONAJE? Ampliación del rombicuboctaedro, el elemento más enigmático del cuadro.

vamente. Las biografías de Pacioli suelen describirlo más como un gran maestro itinerante que como un creador, por lo que tradicionalmente el cuadro ha sido interpretado como un retrato de Pacioli impartiendo clase.

Sin embargo, Pacioli parece más bien en éxtasis, con la mirada perdida en los mundos de Platón. Que el libro XIII de los *Elementos* esté abierto y *Summa* cerrado y en un extremo indica que Pacioli da prioridad al primero e invita al espectador a beber de las fuentes clásicas. Así pues, parece más plausible que Pacioli redescubriese el rombicuboctaedro por su cuenta y quisiese dejar constancia histórica mediante un memorable cuadro.

La disposición de los objetos que se hallan sobre la mesa, típicos del quehacer matemático de la época y que dan a la obra un aire de naturaleza muerta misteriosa, parecen más a mano del espectador que del propio Pacioli. Invitan a usar el razonamiento matemático basado en figuras geométricas, a adentrarse en esa nueva ciencia de la perspectiva que aúna el arte y la matemática.

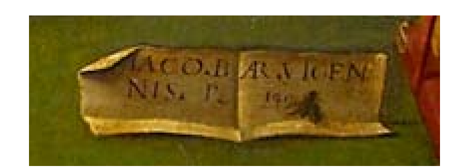
Algunos críticos de arte han llamado «eterno estudiante» al joven que aparece a la siniestra de Pacioli; algo así como el soldado desconocido. Pero el eterno estudiante mira con altanería al espectador. Por eso, otros expertos opinan que el acompañante no era otro que su señor de turno, Guidobaldo da Montefeltro, duque de Urbino, al que Pacioli dedicó su *Summa*. Hace poco, sin embargo, se ha propuesto una identificación extraordinaria.

Melancolía

No hace mucho se descubrió un manuscrito inédito de Pacioli: *De viribus quantitatis* («Sobre el poder de los números»). El que ahora es el primer libro conocido de magia y juegos matemáticos de la historia occidental llevaba cinco siglos languideciendo en la biblioteca de la Universidad de Bolonia. La obra incluía una sección de cuadrados mágicos, por lo que el matemático Nick Mackinnon, que a la sazón investigaba sobre el cuadro, pensó inmediatamente en *Melancolía I*, de Alberto Durero (1471-1528).

Melancolía I es un grabado que, como el *Hombre de Vitruvio* de Da Vinci, ha acabado convirtiéndose en un icono del mestizaje entre arte y matemáticas característico del Renacimiento. Contiene un famoso cuadrado mágico de 4 × 4 números. En Europa solo se conocen dos representaciones de un cuadrado mágico anteriores a la de Durero: una es la de Pacioli; la otra aparece en un manuscrito denominado *Jagiellonian MS 753,* homónimo de la universidad que lo custodia, en Cracovia.

Pacioli se codeó con los grandes artistas y matemáticos de su época, como su paisano y mentor Piero della Francesca, matemático y pintor, o el arquitecto Leon Battista Alberti. Y, en efecto, hoy sabemos que Durero visitó a Pacioli en 1495. Si a ello añadimos la semejanza expresiva y física que el joven desconocido guarda con los autorretratos de Durero, incluido el característico tono pelirrojo de su cabellera, los indicios parecen trocarse en evidencia. Más tarde, Durero se convertiría en uno de los grandes artistas matemáticos de todos los tiempos. Escribió una de las obras de geometría más importantes del siglo XVI y contribuyó de manera decisiva a la matematización y divulgación de la perspectiva.



FIRMA INCIERTA: Ampliación de la pequeña nota. ¿Esconde la inscripción una ecuación en notación algebraica?

Si todo este encaje de bolillos es correcto, el cuadro de Pacioli estaría inmortalizando un encuentro sublime entre el arte y la matemática renacentistas a través de la reunión de tres de sus grandes personajes: Pacioli, Leonardo y Durero. El cuadro plasmaría el momento en que la nueva ciencia de la perspectiva, desarrollada en la Italia del Renacimiento, comenzó su andadura por el resto de Europa.

El *cartiglio*

Acabemos con un último misterio. Cerca de *Summa* aparece una pequeña tarjeta con una inscripción: «IACO. B AR. VIGENNIS. P. 149*», donde la última cifra no se aprecia con claridad ya que sobre ella hay una mosca. Este *cartiglio* es la razón por la que la autoría del cuadro se ha asociado al pintor Jacobo de Barbari: *Jacopo de Barbari vigennis pinxit 149**.

El problema radica en que *vigennis* significa «de veinte» (años). Pero Jacobo de Barbari debía rondar en aquel momento los 55. Da Vinci tenía unos 44 años cuando conoció a Pacioli, por lo que *vigennis* tampoco parece referirse a él. No he leído ningún estudio que lo proponga, pero tal vez la inscripción sea un acertijo algebraico que ha de interpretarse en notación sincopada.

En notación sincopada, la incógnita de una ecuación —lo que hoy solemos denotar por x— se llamaba *cosa* en italiano y se escribía *co*. Para indicar la abreviatura de la raíz cuadrada se empleaba una variante de la letra R, y para el signo +, la letra P, de *più*. Si suponemos que la mosca tapa la última cifra para que solo utilicemos el número 149, no parece descabellado concluir que nos hallamos ante la ecuación $x = \sqrt{20 + 149}$. El resultado de esta operación es 13. ¿Qué puede significar?

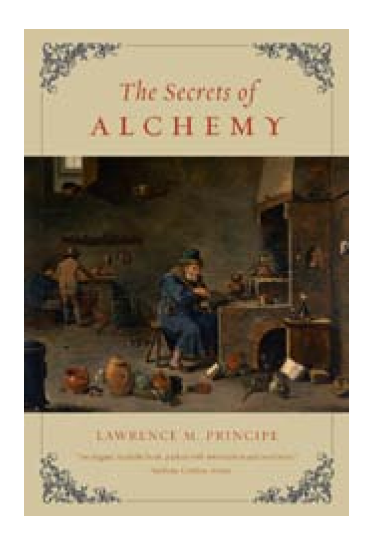
En *De divina* se detallan los trece efectos que produce en una línea la división según la razón áurea. Al respecto, Pacioli escribe: «Hemos elegido solo estos trece en honor al grupo de los doce y su Señor, nuestro Santísimo Redentor Cristo Jesús».

Leonardo da Vinci comenzó *La última cena*, considerada una de las mejores obras pictóricas de todos los tiempos, justamente en 1495. Incluso en la literatura especializada se ha especulado con la posibilidad de que se autorretratara en ella como Judas Tadeo. ¿Es entonces el *cartiglio* un juego matemático que oculta la firma de Leonardo? ¿Se le ocurren al lector otras alternativas?

PARA SABER MÁS

The portrait of Fra Luca Pacioli. Nick Mackinnon en *The Mathematical Gazette*, vol. 77, n.º 479, págs. 130-219, julio de 1993.

Portrait of Fra Luca Pacioli and disciple: A new mathematical look. Renzo Baldasso en *The Art Bulletin*, vol. 92, n.º 1/2, págs. 83-102, marzo-junio de 2010.



THE SECRETS OF ALCHEMY

Por Lawrence M. Principe. The University of Chicago Press, Chicago, 2013.

Alquimia

Síntesis de una búsqueda científica secular

Autor de larga trayectoria, de alguno de cuyos libros nos hemos hecho eco en estas páginas, Lawrence M. Principe ofrece una síntesis sólida de cuanto se conoce sobre los fundamentos racionales y empíricos de la alquimia, sin olvidar sus afanes esotéricos. Criba las falsas interpretaciones y prejuicios que han rodeado al tema, incluida su asociación con la magia y la brujería. El autor es historiador de la ciencia y químico experimentado.

Nuestra imaginación se excita ante la idea de transmutar lo común en único. La crisopeya y otros empeños alquímicos incorporan esa fascinación. Pero la alquimia es mucho más que obtener oro en la retorta, mucho más que transformar una sustancia en otra. Desde el tiempo de su aparición en el Egipto grecorromano, hace unos 2000 años, y hasta la actualidad, la alquimia ha evolucionado en diversos contextos culturales e intelectuales, para desplegarse a lo largo de líneas múltiples. Temas afines a los desarrollados en la alquimia occidental fueron también abordados en las investigaciones iniciales de Extremo Oriente (China e India). Principe los deja de lado al no disponer de textos suficientes, porque cuando se ha intentado combinar la alquimia de Occidente con la de Oriente se ha terminado en una confusión inextricable. Por culpa de semejante enredo, se ha difundido la idea errónea de que los alquimistas europeos buscaban el elixir de la inmortalidad. Aunque los alquimistas europeos sí investigaron sobre medicinas que alargaran la vida, la búsqueda de una inmortalidad terrena fue propósito exclusivo de la alquimia china.

La alquimia conjugó praxis con teoría. Fue texto y ensayo en constante interacción. Las concepciones de la materia y su composición (alma y cuerpo de Zósimo, mercurio y azufre de Jabir, minima de Geber, *tria prima* de Paracelso, materia prima y forma sustancial de los escolásticos, los semina de van Helmont y todos los demás) dirigían la intención y el quehacer del alquimista. Se van desmontando viejos prejuicios que veían en la alquimia burda trapacería de ensayo y error; las observaciones en el laboratorio y en el mundo tejieron un núcleo de experiencias a partir de las cuales emergieron las teorías y continuaron desarrollándose.

Con su énfasis sobre el trabajo práctico, la alquimia era también una empresa productiva. Crear nuevos materiales y mejorar los comunes forman un tema central de la tradición alquimista. Los productos que los alquimistas deseaban obtener abarcaban desde los soñados (piedra filosofal, alkagesto y oro potable) hasta los extraídos a partir de menas; a través de agentes transmutantes y preparaciones farmacéuticas y espagíricas, se perseguían mejores aleaciones, pigmentos, cristales, tintes, cosmética y otros bienes de interés comercial.

Les acompañaba la voluntad de profundizar en el dominio del mundo natural. Para trabajar con la materia y transformarla con éxito había que desentrañar antes su constitución escondida y comprender sus propiedades. Formularon así hipótesis sobre micropartículas de materia semipermanentes y ocultas que se suponían ínsitas en el corazón de la transmutación y causantes de los resultados observados. Se percataron de la conservación del peso de los materiales empleados en sus experimentos y convirtieron ese parámetro en quicio de los ensayos, apoyándose en él para seguir los resultados mucho mejor de lo que pudieran hacerlo a simple vista. Catalogaron sustancias y sus propiedades, que daban fe de la riqueza y diversidad de la naturaleza. En breve, se proponían entender el mundo natural para descubrir, observar y utilizar sus procesos, para formular y refinar explicaciones de sus funciones y desentrañar sus arcanos secretos.

Los historiadores de la ciencia acostumbran a dividir la alquimia occidental en tres grandes períodos cronológicos: greco-egipcio, árabe y europeo latino. El período greco-egipcio (y más tarde, bizantino), que se extiende desde el siglo tercero hasta el siglo nono, puso los fundamentos de la alquimia y estableció muchos rasgos que habrían de caracterizarle el resto de su vida. El período árabe o islámico (del siglo octavo al decimoquinto) se apropió del legado greco-egipcio y lo incrementó con marcos teóricos fundamentales y un aluvión de técnicas prácticas. La alquimia llegó a Europa como una ciencia árabe, según se refleja en su propia denominación, *al-chymia*. Fue en Europa donde alcanzó su máximo esplendor y cultivo más duradero. Tras su establecimiento en la Alta Edad Media (del siglo XII al XV), la alquimia conoció su edad de oro durante el comienzo del período moderno (del siglo XVI a los primeros decenios del XVIII), el tiempo de la revolución científica. La alquimia de este período, la más avanzada y diversificada, multiplicó su difusión en tratados y libros. Podríamos añadir una cuarta época, la que se extiende desde el siglo XVIII hasta nuestros días. A esta última etapa debemos la atención prestada a la alquimia y las nuevas interpretaciones de tradiciones anteriores.

Para localizar los orígenes de la alquimia hemos de retrotraernos a Egipto, pero no al Egipto de los faraones o los constructores de pirámides, sino a la civilización cosmopolita y helenizada de los primeros siglos de la era cristiana. Egipto había caído bajo la influencia cultural griega después de la conquista de Alejandro en sus campañas militares de 334-323 a.C. Tras la absorción de Egipto por el Imperio Romano, en el siglo I a.C., su ciudad principal, Alejandría, fundada en 331 y dedicada al propio Alejandro, se convirtió en cruce de caminos para culturas, gentes e ideas. De esa mezcla del Oriente mediterráneo proceden los primeros textos químicos y allí nació su nombre *chymica*. Con anterioridad se habían ido asentando operaciones técnicas que



serían fundamentales para la alquimia. La fundición de metales (plata, estaño, cobre o plomo) a partir de sus menas se había venido practicando desde hacía 4000 años. Se había desarrollado, entre otras técnicas, la de la formación de aleaciones, como el bronce y el latón. En Egipto había una artesanía de la manipulación del vidrio, creación de gemas artificiales, cosméticos y otros productos que reflejaban una química ya establecida.

Cuenta Plutarco, del siglo I d.C., que la palabra *chemia* era un nombre antiguo para designar «Egipto». Pero parece más bien derivar del griego *cheo*, que significa «fundir» o «mezclar». De *cheo* deriva también el término griego *chuma*, que significa «lingote de metal». La palabra griega de la disciplina es *chemeia*, que significa «arte de la fundición de metales».

Los primeros textos que los estudiosos atribuyen a la historia de la alquimia se escribieron en griego sobre papiros en el siglo tercero de nuestra era. Fueron descubiertos en Egipto seis siglos más tarde, y ahora se conservan en los museos de Leiden y Estocolmo. Contienen unas 250 recetas prácticas. Podemos clasificarlas en cuatro categorías principales: procesos relacionados con el oro, con la plata, piedras preciosas y tintes textiles. Como se aprecia, todos ellos objetos de lujo e interés comercial. Resulta notable que la mayoría de las recetas se refieran a imitaciones de esos objetos valiosos: coloración de la plata para que parezca oro, coloración del cobre para que parezca plata, fabricación de perlas artificiales y esmeraldas. Con una tinción purpúrea creada en el taller, se remedaba en barato la tinción de púrpura imperial, extraordinariamente cara, obtenida del caracol marino *Murex*. Puesto que los papiros contienen una serie de preceptos para determinar la pureza de diversos metales, preciosos y comunes, resulta manifiesto que los usuarios de esas fórmulas comprendían claramente la diferencia entre artículos genuinos y artículos de imitación.

Los papiros de Leiden y Estocolmo no son los únicos documentos originales que han sobrevivido del período greco-egipcio. Se escribieron muchos libros y tratados en ese período que nos han llegado en colecciones de fragmentos; conforman el *Corpus alchemicum graecum*, compilado por autores bizantinos. El texto más antiguo del *Corpus* se redactó en las postrimerías del siglo primero o en el siglo segundo d.C.; lleva por título *Physika kai mystica*. Pese al título, no guarda ninguna relación con lo que entendemos por mística en el pensamiento religioso, sino que designa lo secreto y oculto. Se le atribuye a Demócrito, pero no tiene nada que ver con el filósofo atomista del siglo quinto a.C. Igual que los papiros mencionados, se propone imitar metales preciosos. El proceso de fabricar oro se llamaba *chrysopoeia*; solía ir acompañado de la *argyropoeia*, o fabricación de plata.

En ese momento constituía una autoridad Zósimo de Panópolis, que desarrolló su actividad en torno al año 300 d.C. Los escritos de Zósimo se centran en la transmutación de los metales, praxis para lograrla y medios para superar las dificultades. Lejos del mero recetario, se esfuerza en aplicar principios teóricos. Se muestra particularmente interesado en la acción de vapores y sólidos (los vapores de mercurio y arsénico blanquean el cobre hasta darle una coloración argéntea). Celoso de sus hallazgos, emplea una técnica que habrán de seguir todos los alquimistas, la de velar con nombres ininteligibles objetos, procesos y resultados.

La vida de Zósimo coincidió con la violenta supresión de la rebelión de Egipto contra el emperador Diocleciano en 297-298, quien se propuso también destruir el legado bibliográfico alquimista. El emperador ordenó que se quemaran todos los libros escritos por los egipcios sobre química del oro y la plata. La medida se enmarcaba en la reforma monetaria acometida, que sustituía las monedas provinciales egipcias, acuñadas en Alejandría, por la moneda oficial romana. La moneda oficial se había hundido debido a la acuñación de monedas con una cantidad crecientemente menor de metal precioso.

La alquimia conoció un desarrollo espectacular durante su período árabe, entre 750 y 1400. Los textos atribuidos a Jabir ibn Hayyan, posiblemente un nombre colectivo, desempeñaron en la alquimia árabe el papel que los libros de Zósimo en la alquimia greco-egipcia. Las obras con su nombre se remontan a mediados del siglo nono y se suceden a lo largo de una centuria; contienen información práctica sobre procesos, materiales y aparatos con riqueza de explicaciones teóricas. Destaca su teoría del mercurio-azufre sobre los metales, presentada en el *Libro de la iluminación*; pero es anterior y pudiera retrotraer a la explicación aristotélica de las exhalaciones que emanan del centro de la Tierra. Una es seca y humeante; la otra, húmeda y vaporosa. En el subsuelo, esas exhalaciones se condensan y produ-

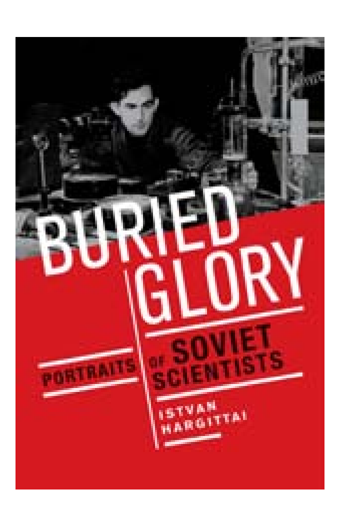
cen rocas y minerales. Pero la fuente de Jabir no es Aristóteles, sino una obra crucial de comienzos del siglo IX, el *Libro del secreto de la Creación*, de Balinus.

Todos los metales, expone Jabir, constan de dos principios: mercurio (exhalación húmeda) y azufre (exhalación seca). Esos dos principios, condensados en el subsuelo, se combinan, en diferentes proporciones y grados de pureza, para producir metales. El oro resulta de la combinación perfecta del azufre y el mercurio más puros en proporciones exactas. Pero cuando el mercurio o el azufre no son puros, o no se combinan en la proporción correcta, aparecen metales más bastos. Esta teoría aporta la base doctrinal de la transmutación. Si todos los metales comparten los mismos dos ingredientes y difieren solo en las proporciones relativas de tales ingredientes, entonces con la purificación del mercurio y el azufre en plomo y el ajuste de sus proporciones podrá obtenerse oro.

El 1144 el monje británico Robert de Chester, que estaba en España, terminó su *De compositione alchemiae*, traducción de un original árabe. Robert era un exponente de lo que se conoce como renacimiento del siglo XII, que dio origen a una eclosión de ideas y estilos (el gótico en arquitectura). Aunque los procesos metalúrgicos y productivos ya estaban asentados, la alquimia constituía toda una novedad. No tardarían los medievales europeos en redactar sus propios libros sobre el arte. Su figura más famosa, Geber, fue probablemente un fraile franciscano, Pablo de Taranto. Su *Theorica et practica* clasifica los minerales y sustancias químicas y las categoriza de acuerdo con sus propiedades químicas y físicas observables. Característico de la alquimia latino-medieval es su dependencia de la teoría física de Aristóteles. Alquimia que llega a su apogeo en la *Summa perfectionis*, que añade a la teoría del azufre-mercurio una teoría de la materia basada en partículas mínimas sustentadoras de las propiedades del metal. Eran las llamadas *minima naturalia*.

Favorecidos por la imprenta, introducida a mediados del siglo XV por Johannes Gutenberg, los textos alquimistas forjaron nuevos vínculos con la filosofía. Dos características distintivas de ese período protomoderno fueron su atención a la transmutación de los metales y el desarrollo de una farmacoterapia. Los químicos del siglo XVII, lo mismo que sus predecesores medievales, reconocieron siete metales: oro, plata, cobre, hierro, estaño, plomo y mercurio. Llamaron nobles al oro y a la plata e innobles a los cinco restantes. La nobleza se fundaba en su belleza, rareza y resistencia a la corrosión. Entendían que los metales eran compuestos, mientras que nosotros los consideramos elementos. Muchos alquimistas continuaron considerando que los metales constaban de proporciones diversas de mercurio y azufre, pero otros comenzaron a adoptar la postura atribuida a Paracelso, que postulaba tres ingredientes: mercurio, azufre y sal. Los había también fieles a Aristóteles y su teoría hilemórfica, de una materia prima común y una forma sustancial; creían que si lograban aislar la materia prima podría ser moldeada por una forma especial y conseguir el metal que se quisiera.

—Luis Alonso



BURIED GLORY. PORTRAITS OF SOVIET SCIENTISTS

Por Istvan Hargittai. Oxford University Press, Oxford, 2014.

Física soviética

Retratos impresionistas

Pese a brillar entre las mentes más conspicuas de la creación e investigación del siglo XX, los físicos soviéticos han sido preteridos por la historia de la ciencia. Su vida se desarrolló casi en el anonimato, ahormados en una rígida burocracia que controlaba con mano férrea su trabajo, con la permanente espada de Damocles del encarcelamiento, muerte incluso, del científico y de su familia. Muchos de esos hombres yacen ahora en el cementerio Novodevichy de Moscú. Aunque la ideología comunista postulaba una sociedad sin clases, la realidad reflejaba una estratificación que llegaba hasta la tumba. Había en esta una jerarquía, que culminaba en el mausoleo de Lenin en la Plaza Roja de Moscú. (Entre 1953 y 1961 fue el mausoleo de Lenin y de Stalin.) El siguiente escalón lo ocupaban los líderes soviéticos, políticos y militares, enterrados en las murallas del Kremlin; entre ellos, Sergei Korolev, jefe de construcción de los cohetes espaciales soviéticos, e Igor Kurchatov, el zar nuclear. En Novodevichy reposan dignatarios del Soviet supremo, así como escritores, artistas y científicos anteriores a la Revolución y posteriores a la caída del comunismo.

Apoyándose en una minuciosa investigación archivística, entrevistas personales y sus propios recuerdos, Istvan Hargittai retrata a catorce científicos soviéticos sobresalientes, sometidos al direccionismo letal y al terror del régimen comunista. El libro, dedicado a su padre, Jeno Wilhelm, abogado de Budapest que fue el primer miembro de su familia en adquirir una formación universitaria, constituye un descargo de conciencia más que un ajuste de cuentas. Al progenitor, enviado a una unidad de castigo en el Frente Oriental durante la Segunda Guerra Mundial, le estalló la mina que intentaba desactivar a mano; sus restos reposan en una fosa común de Rusia.

Entre los eminentes científicos reseñados sobresalen Petr L. Kapitza, premio Nobel que arriesgó su carrera y su privilegiada situación social defendiendo a varios colegas; Yulii B. Khariton, jefe del laboratorio secreto de armas nucleares, Arzamas-16, pese a ser judío y tener a su padre Boris en un campo de trabajo, y Andrei Sakharov, creador de la bomba soviética de hidrógeno. Si bien el resto no les anduvo en la zaga. Pero ¿por qué existe un gran desconocimiento de ellos

en Occidente? Sí disfrutó, en cambio, de predicamento el programa espacial tras el éxito obtenido con el primer *Sputnik*, lanzado en 1957, y el primer vuelo espacial, tripulado por Yuri Gagarin, en 1961.

Durante la Guerra Fría, en el período transcurrido entre 1945 y 1991, el equilibrio de fuerzas entre las dos superpotencias (Estados Unidos y la Unión Soviética, con sus respectivos aliados) posibilitó el mantenimiento de una paz frágil, amenazada por un arsenal armamentístico capaz de acabar, varias veces, con el bando antagonista. En otros aspectos, las diferencias eran clamorosas. Occidente disfrutaba de un progreso tecnológico avanzado, en tanto que la Unión Soviética pugnaba por salir de una miseria secular.

El poderío militar soviético se debía en buena medida a los logros de sus científicos y a la capacidad del régimen comunista de concentrar recursos limitados en determinadas tareas. La Unión Soviética no se hubiera convertido en superpotencia sin una sólida base científica cuyos fundamentos se pusieron durante los años veinte y treinta. Ser científico era una de las profesiones privilegiadas, un imán para jóvenes con talento que veían ahí un futuro. Sectores extensos de la población que durante los zares no pudieron soñar con un acceso a la universidad se sentían ahora apremiados a hacerlo. Se facilitaron las interacciones con el resto del mundo y viajes de estudio a Europa Occidental. Se invitó a científicos prominentes a los congresos y a los laboratorios domésticos. Se buscaba con ello elevar el nivel de la ciencia hasta equipararla con la occidental —una ambición que contrasta con la precariedad de medios y financiación de nuestros días— [*véase* «La investigación soviética durante la Guerra Fría», por Alexei B. Kojevnikov; Investigación y Ciencia, abril de 2014].

Pero esa apertura cambió desde el inicio del decenio de los treinta debido a diversos factores. Entre ellos, la demanda del estado soviético de implicar a los científicos de forma creciente en la solución de problemas relacionados con la economía y, de manera especial, con los asuntos militares. Comenzó de un modo inocuo. Hubo un debate en el Instituto Ucraniano de Tecnología Física sobre si el perfil del Instituto debía o no cambiar para dedicarse a problemas prácticos. En un principio la discusión era abierta y democrática. Pero muy pronto se desencadenó un feroz enfrentamiento entre ambas posturas. La aplicación de la ciencia, especialmente en usos militares, exigía que en buena medida estuviera clasificada. No fue ajena a ello la paranoia de Stalin ante todo lo extranjero; impulsó el aislamiento que caracterizó a la Unión Soviética durante su mandato.

El terror estalinista se plasmó en asesinatos en masa y deportaciones de comunidades enteras, con Nikolai Ezhov de mano ejecutora. Su sucesor Lavrentii Beria no fue menos sanguinario, aunque de maneras más refinadas. Entre las víctimas, junto a líderes del partido comunista soviético y del ejército rojo, había numerosos físicos, biólogos, químicos y otros científicos. Tras la segunda Guerra Mundial se produjo otro episodio de terror, que abarcó el quinquenio de 1948 a 1953. En la segunda mitad del decenio de los treinta no hubo rama de la ciencia que fuera inmune a la persecución. En el período posterior a la Segunda Guerra, la física constituyó una excepción. Stalin se percató de que, sin física ni físicos, no habría armas nucleares. La cuestión era si la pureza ideológica era más importante que la bomba atómica o la bomba de hidrógeno. La física no podría haber aportado la segunda sin la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, que habían sido consideradas productos de ideologías burguesas.

Frente a esa situación privilegiada de los físicos, la precariedad de otras ciencias se agravó durante el estalinismo. La biología sufrió el daño más severo a manos de Trofim Lysenko, biólogo y agrónomo oficial. El propio Stalin respaldó la presentación de Lysenko en 1948 en la academia de agricultura, en la que lanzó un ataque frontal contra la biología moderna. La consigna comunista era evitar que la influencia occidental penetrara en la sociedad soviética. Las áreas de computerización, automación y otras disciplinas dependientes de la tecnología, cuanto pudiéramos considerar del dominio de la «cibernética», fueron también objeto de ataque, pues simbolizaban todo el mal que una sociedad imperialista y burguesa podía ofrecer. Las condiciones devastadoras de la biología y la cibernética en la Unión Soviética no solo impidieron el bienestar de la sociedad, sino que también frenaron su capacidad militar.

Fueron los físicos los que acudieron al rescate de la biología, primero con cautela y luego con resuelta determinación. Igor Tamm, Sakharov, Kapitza, Igor Kurchatov y otros se mostraron cada vez más decididos ante las posibles consecuencias biológicas de las pruebas nucleares. Tamm, fallecido en 1971, procedía de una familia mitad alemana mitad cosaca. Su padre, ingeniero, intervino en la construcción del ferrocarril transiberiano. En el bachillerato, Igor se convirtió en militante socialista. Para alejarlo de la política turbulenta, sus padres lo enviaron a estudiar a Edimburgo. Al año siguiente, en 1914, volvió a Rusia y se graduó en física y matemática en la Universidad de Moscú. Se opuso a la guerra recién desencadenada y postuló la revolución como salida al progreso. Pasó en Europa Occidental el curso académico 1927-28, disfrutando en especial de su estancia en Leiden con Paul Ehrenfest. Aprovechó para trabar relaciones con Albert Einstein, Walter Elsasser, Pieter Zeeman, Oskar Klein, Erwin Schrödinger, Niels Bohr y, en particular, Paul Dirac. En 1929 descubrió el fonón. Pertenece al dominio de la conductividad eléctrica y térmica de sólidos cristalinos y líquidos ordenados. En efecto, las unidades constructoras de tales fases condensadas (átomos, iones o moléculas) pueden ser excitadas por interferencia externa. La respuesta es una excitación colectiva, el fonón.

Tras la guerra, Tamm pasó a liderar parte de la investigación secreta sobre armas nucleares. En agosto de 1953 se ensayó la primera bomba de hidrógeno soviética. Tras el éxito, él y otros fueron colmados de honores, incluidos nuevos apartamentos, dachas y automóviles. La producción científica de Tamm no fue muy elevada en volumen, unos setenta artículos y dos monografías. Abarcaron cuatro áreas principales: teoría macroscópica, teoría del núcleo atómico, teoría de las partículas elementales y sus interacciones, y aplicaciones. La contribución por la que él y sus colaboradores recibieron el premio Nobel pertenecía a la primera área. Ese trabajo lo realizó entre 1937 y 1944, en parte con Ilya Frank. Se trataba de la interpretación teórica del efecto de Vavilov-Cherenkov. Ese efecto, descubierto de manera experimental, se funda en un mecanismo de emisión de luz por partículas céleres. Se aplicó al establecimiento de técnicas para la detección de partículas cargadas, que se mueven con rapidez en el aire, agua, hielo y otros medios. Para la partícula radiante, el efecto conduce a un nuevo mecanismo de resistencia como consecuencia de colisiones con otras muchas partículas del mismo medio.

El autor dudó en incluir en la selección a Kurchatov, físico eminente del nivel de los mejores occidentales. Lo eliminó del

elenco al comprobar que fue el receptor privilegiado de la información sobre bombas nucleares obtenida por el espionaje soviético en Occidente. Tenía cuarenta años cuando fue nombrado director del programa nuclear soviético. Otros jefes del proyecto soviético sobre la bomba recibieron datos del espionaje, pero nadie tuvo acceso directo a los informes como Kurchatov. Este no podía revelar las fuentes de información. Sus colegas se maravillaban de la seguridad de sus aportaciones y las soluciones que siempre se mostraban acertadas; pensaban que los progresos se producían en laboratorios secretos soviéticos. Khariton fue también receptor de información procedente del servicio secreto, pero en su caso cabe delinear con nitidez sus aportaciones personales antes de que se integrara en el programa armamentístico como jefe del laboratorio nuclear soviético secreto de Arzamas-16.

Kapitza, muerto hace ahora treinta años, fue quizás el representante más eximio de esa generación extraordinariamente potente. Hijo de ingeniero militar y profesora de literatura, Kapitza tuvo una formación exquisita. Visitó en su infancia Suiza, Italia, Grecia, Alemania, Escocia y extensas regiones de la Rusia septentrional. Brillante en matemáticas, se matriculó en el Instituto de Tecnología de San Petersburgo, donde Abram Ioffe le encauzó hacia la investigación. Su primer artículo sobre física de electrones apareció en la *Revista de la Sociedad Rusa de Fisico-Química*. Con Nikolai Semenov diseñó un nuevo método para determinar el momento magnético de los átomos.

En 1921 viajó a Inglaterra como miembro de una delegación soviética de ciencia para estrechar lazos con la investigación occidental. En Cambridge quedó impresionado con lo que observó, y pidió a Ernest Rutherford que lo admitiera en su laboratorio Cavendish. Rutherford le respondió que estaba lleno y no cabía ningún investigador más. Pero el ruso insistió y doblegó su voluntad al señalar que la adición de un miembro más entraba dentro de un error experimental del 3 por ciento que caracterizaba los trabajos de Rutherford en física.

En Cambridge, Kapitza fundó un seminario informal (una reunión semanal en su apartamento) donde se daba cuenta de los últimos resultados. La primera sesión comenzó el 17 de octubre de 1922 con una exposición del propio Kapitza sobre magnetismo. La última sesión del Club Kapitza antes de su detención en la Unión Soviética el 21 de agosto de 1934 fue la que hacía el número 377. En 1923 defendió la tesis de doctorado sobre campos magnéticos extremadamente intensos. Rutherford le hizo su adjunto de dirección en la investigación sobre magnetismo del laboratorio Cavendish. Fue elegido miembro del Trinity College.

Una vez al año, Kapitza volvía a su Rusia natal, lo que le permitía anudar relaciones con los científicos de su país y analizar los problemas que allí encontraba la investigación científica. Esas visitas venían instadas por Lev Trotsky y Lev Kamenev, que habrían de ser víctimas del terror estalinista. En 1933 se hizo cargo de un nuevo laboratorio de investigación magnética en el Cavendish financiado por Ludwig Mond. Un año después, logró la licuefacción del helio empleando un aparato original de su propia creación. Trabajó estrechamente con su doctorando John Cockcroft. En septiembre de 1934 se aprestó a realizar su visita anual, aunque no solicitó garantía de vuelta una vez concluida su tarea. No se le permitió volver. Fue una orden directa de Stalin. Se le prometió a cambio crearle un instituto cerca de Moscú, con los colaboradores que escogiera, una residencia familiar y la compra en el extranjero de los aparatos que necesitara. El centro se llamó Instituto de Problemas Físicos. Durante 32 años se le prohibió que volviera a Inglaterra. En octubre de 1937 murió Rutherford. Kapitza escribió a Niels Bohr: «He vivido todos estos años con la esperanza de volver a ver a Rutherford, una esperanza que se ha perdido ya para siempre [...]. Estimaba a Rutherford [...]. Aprendí mucho de él, no física, sino cómo hacer física.»

—*Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



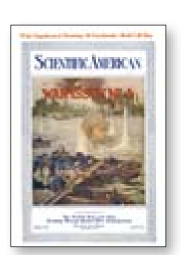
Diciembre 1964

Piedras lunares

«Esperamos que el estudio de la geología lunar ayude a aclarar algunas de las incógnitas planteadas desde hace tiempo acerca de la evolución temprana de la Tierra. La Luna y la Tierra forman un sistema binario y probablemente ambos cuerpos guardan una estrecha relación en lo que concierne a su origen. A este respecto la Luna ofrece un interés particular porque su superficie no ha sufrido la erosión por corrientes de agua que ha contribuido a configurar la superficie terrestre. —Eugene M. Shoemaker.»

El amianto: ¿un problema?

«En un futuro inmediato, puede que el polvo de amianto, constituido por finas fibras insolubles y casi indestructibles, llegue a convertirse en un problema para la salud pública. En una reciente conferencia internacional sobre los efectos biológicos del amianto, patrocinada por la Academia de Ciencias de Nueva York, los participantes señalaron que los trabajadores expuestos al polvo propenden a desarrollar cáncer de pulmón al llegar a edades avanzadas; también indicaron que el uso de esta familia de compuestos de silicatos fibrosos ha proliferado durante los últimos decenios. El amianto, o asbesto, que hace cien años era una curiosidad de laboratorio, representa hoy un componente muy importante de los materiales de construcción.»



Diciembre 1914

Bloqueo naval

«Alemania puede proveerse a sí misma con sus propios recursos durante todo un año; esa capacidad de autoabastecimiento, a pesar del embargo general [el bloqueo de la armada británica], posee un enorme valor militar. Quizá resulte cierto que mucho antes del próximo agosto, si es que la guerra durase tanto, la vida cotidiana del pueblo alemán sufrirá no pocos cambios. Tal vez tendrá que acostumbrarse a consumir una mayor parte de su cosecha anual de patatas, de unos dos mil millones de fanegas, la mayoría de la cual se emplea hoy en la producción de alcohol industrial.»

Espionaje en Arabia

«Bajo los auspicios del Fondo de Exploración de Palestina, se ha efectuado en tiempo reciente una extensa labor de topografía y exploración en la frontera meridional de Palestina. La han llevado a cabo equipos dirigidos por el capitán S. F. Newcombe, de los Ingenieros Reales del ejército británico, con la participación de dos arqueólogos del Museo Británico. Cinco equipos se ocuparon del levantamiento del mapa de toda la región fronteriza salvo una pequeña zona en torno de Áqaba, donde las autoridades turcas denegaron la debida autorización.»

El levantamiento se efectuó en realidad con propósitos militares clandestinos, para trazar el mapa de los limites meridionales del Imperio Otomano. Uno de los «dos arqueólogos» era T. E. Lawrence, a quien posteriormente se conocería por el apodo de «Lawrence de Arabia».



MOTOCICLETA EXPERIMENTAL: Una interesante propuesta para el transporte, 1914.

Monociclo motorizado

«La idea de un vehículo de rueda única no es en absoluto nueva. Lo novedoso del vehículo a motor que se ilustra no reside en que sea de una sola rueda, sino en que se halla estabilizado mediante un giróscopo. El vehículo no ha sido construido, pero su diseño ha sido ofrecido por un lector de esta revista como sugerencia para algún inventor de espíritu emprendedor.»

En ScientificAmerican.com/dec2014/motor-vehicles se ofrece una selección de diapositivas sobre el desarrollo de la tecnología de los vehículos de motor desde 1914.



Diciembre 1864

El vicio se resiste

«El doctor Alfred Taylor, comisionado por el Consejo Privado de Inglaterra, ha presentado un informe. El láudano (tintura de opio) parece que se vende en grandes cantidades; cada sábado por la noche, las tiendas suelen servir a trescientos o cuatrocientos clientes. Los farmacéuticos a menudo despachan noventa kilos al año y un marido se quejó de que su esposa había consumido cien libras esterlinas de opio desde que se casaron. Nos asegura un distribuidor de productos farmacéuticos que en los países de Oriente él podía vender esa droga, y así lo hacía, en cantidades que ascendían a miles de kilos al año. Este caballero, un observador atento, declaró que la demanda había crecido poco después de iniciarse el movimiento de abstención alcohólica (*teetotalism*).»

Gracias a los dioses

«La *Peking Gazette* contiene un informe del Gobierno chino acerca de la extinción de la rebelión de Taiping que acaba con las palabras siguientes: "Es, pues, de todo punto necesario que gracias sean dadas a los dioses por su ayuda. Por ello se ha ordenado al Consejo de Ritos que examine los servicios prestados por los distintos dioses y que informe a este Gobierno."»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXI, N.º 24, 12 DE DICIEMBRE DE 1914

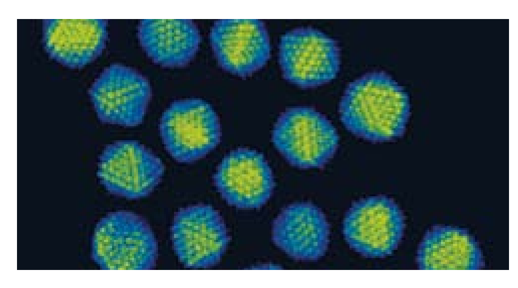


NEUROCIENCIA

Neurociencia de la meditación

Matthieu Ricard, Antoine Lutz y Richard J. Davidson

Ciertas prácticas contemplativas milenarias proporcionan múltiples beneficios para el cuerpo y la mente.



MEDICINA

Viroterapia contra el cáncer

Douglas J. Mahoney, David F. Stojdl y Gordon Laird

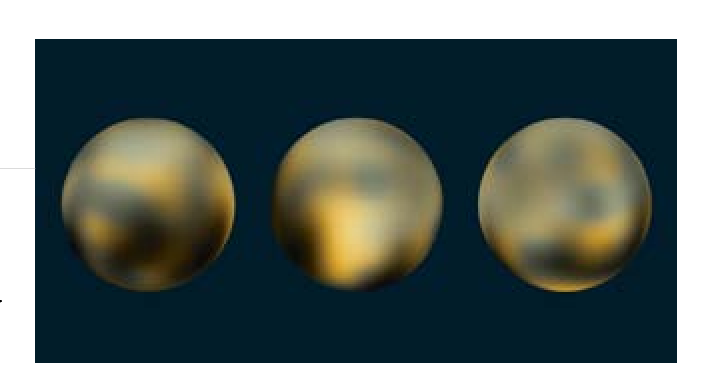
Para algunos pacientes de cáncer, los virus diseñados por ingeniería genética para que actúen directamente sobre las células tumorales funcionan igual que un fármaco milagroso.

LINGÜÍSTICA

La diversidad lingüística de los Andes

Paul Heggarty

La comparación entre las lenguas andinas actuales y ciertos documentos españoles arroja nueva luz sobre el desarrollo de las civilizaciones de esa región.



ESPACIO

Misiones al cinturón de Kuiper

Michael D. Lemonick

Por primera vez unas naves espaciales explorarán de cerca cometas, asteroides y planetas que orbitan más allá de Neptuno. Estas sondas deberían revelar como se formó el sistema solar.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Mercè Piqueras: *Ciencia accesible a todo el mundo*; Andrés Martínez: *Amenaza para los puntos calientes de biodiversidad y Apuntes*; Bartolo Luque: *El valor resbaladizo de p*; Marián Beltrán: *La fórmula de la inclusión, Beneficios de la diversidad social, Diferencias por razón de sexo y Todo el mundo es bienvenido*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Guzmán Sánchez: *Fuerzas mecánicas en las células*; Fabio Teixidó: *Flores y ribetes de hielo*; Tanja Sachse: *Fases de Zintl*; Noela Fariña: *El caso contra Copérnico*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España